

山东广饶地区晚更新世以来沉积演化与古气候变迁

杨剑萍¹ 庞效林^{1,2} 王海峰³ 贾军涛¹ 刘玲⁴

(1.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 山东青岛 266580;2.山东正元地球物理信息技术有限公司 济南 250101;
3.中海油研究总院 北京 100027;4.中国地质大学能源学院 北京 100083)

摘要 受晚更新世以来海侵影响,渤海西南内陆第四系浅层经历了复杂的海陆交替演化。利用4口钻孔取芯井和88口静力触探井资料,采用现代测试技术和地层对比的方法对渤海西南内陆广饶地区第四系浅层进行沉积学综合研究。广饶地区地表以下30 m内,南部以风成黄土沉积为主,北部自上而下发育两期海相层,在研究区称为第一、第二海侵层,分别是10~4 ka B.P.的黄骅海侵层和40~28 ka B.P.的献县海侵层。黄土沉积于晚更新世玉木冰期,在研究区南部以17 m为界划分为大站组和羊栏河组(未见底)。晚更新世以来发生两期海侵事件(黄骅海侵、献县海侵),在海侵范围最大时到达广饶地区,先后对冰期沉积黄土层侵蚀改造,形成了“上超型海蚀黄土”的海侵演化模式。根据海侵与黄土沉积演化所对应的古气候变迁,将研究区晚更新世以来气候演变划分为6个期次:干冷期、温暖湿润期、干冷偏凉期、温暖期、潮湿湿润期和现代气候期,对应不同的沉积演化特征。

关键词 广饶地区 晚更新世 海侵与黄土 沉积演化 古气候演变

第一作者简介 杨剑萍 女 1965年出生 博士 教授 沉积学 E-mail: yangjp3028@sina.com

中图分类号 P534.63 **文献标识码** A

0 引言

晚第四纪全球性气候波动导致海平面升降变化,环渤海沿岸历经沧桑,形成了多套海相与陆相交替沉积的地层。广饶地区最大海侵古岸线的研究,对于了解晚更新世以来环渤海内陆地区的沉积演化,古气候、古环境变迁及海平面变化具有重要意义。

前人对渤海沿岸海侵研究中,主要集中于渤海湾西岸、现代黄河三角洲和莱州湾滨岸地带。通过野外钻孔取芯,从岩性、古地磁、孢粉、第四纪测年、古生物学等特征进行分析,研究滨岸古环境变迁,海侵期次,海侵界线等问题^[1-7]。赵松岭等^[4]、苍树溪等^[2]通过对渤海湾西岸钻孔的研究,阐明了晚更新世至全新世三次海侵事件发生的期次、规模、界线等;王绍鸿^[1]最早对莱州湾西岸晚第四纪海相层进行了研究,论述了海侵发育的最大界线及其沉积环境;汪品先等^[3]对我国东部海侵进行了研究,认为我国第四纪海侵从更新世到全新世逐渐加强,并具有地区性差异;韩有松等^[5]对渤海莱州湾滨海平原第四纪进行了研究,阐述了海侵发育的层位、期次及大致界线;张祖陆

等^[19,22]对莱州湾南岸平原黄土阜进行了研究,受海侵作用影响黄土阜呈带状沿海岸线东西向分布。目前,前人研究中很少涉及内陆最大海侵古岸线地带海侵沉积演化,对海侵与风成黄土沉积演化的时空展布,及其与古气候、古环境变迁的对应关系等也未见相关报道。

结合前人研究,借助钻井资料和样品测试资料,对广饶地区晚更新世以来的海侵沉积演化进行沉积学综合分析,尝试建立以广饶研究区为代表的渤海西南内陆最大海侵古岸线地带海侵沉积演化模式,并对晚更新世以来所对应的古气候变迁进行分析。

1 区域地质概况

广饶研究区位于现代黄河三角洲平原的南部,莱州湾南岸平原的西侧,处于南部山区丘陵冲积平原向滨岸海积平原过渡的地带,区内发育小清河、淄河两条水系(图1)。广饶地区处于暖温带半湿润季风气候区,年平均气温12.6℃,年降水量约600 mm,夏季降水约占全年的76%^[12]。历次黄河改道都未波及到研究区,沉积物源上受黄河影响较小。由引黄济青工

收稿日期:2014-06-20;收修改稿日期:2014-11-13

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05006-002);国家自然科学基金项目(41202126);山东省自然科学基金项目(ZR2012DQ014);中央高校基本科研业务费专项资金项目(13CX02039A);中国石油大学(华东)研究生创新工程(CX2013004) [Foundation: Major Project of National Oil and Gas, No.2011ZX05006-002; National Natural Science Foundation of China, No.41202126; Natural Science Foundation of Shandong Province, No.ZR2012DQ014; Fundamental Research Funds for the Central Universities, No.13CX02039A; Graduate Innovation Project for the China University of Petroleum (East China), No.CX2013004]

程揭露的剖面所确定的黄河冲积物与莱州湾南岸平原沉积物的界线是在广饶县以北,小清河北岸^[25]。构造位置上,研究区位于东营凹陷南斜坡南缘地带,东靠广饶凸起,南临鲁西隆起,西、北接博兴和牛庄洼陷。其所属的构造区域延续了新生代以来的构造趋势,具有整体沉降,局部隆升的特点,第四系地层厚度260 m到400 m不等^[12]。

晚第四纪间冰期,研究区所在的渤海西南沿岸发生过多次海侵事件,沉积了多套海相地层,并在近地表留下了古海蚀崖、侵蚀痕、沿岸堤和贝壳堤等海侵地貌遗迹^[4,8]。距今最近的三期是:8~4 ka B.P.的全新世黄骅海侵,发育第Ⅰ海侵层;40~28 ka B.P.的晚更新世中晚期献县海侵,发育了第Ⅱ海侵层;102~70 ka B.P.的晚更新世早期沧州海侵,发育第Ⅲ海侵层。由于研究区构造区域和地理位置的特殊性,再加上晚第四纪全球性气候波动所导致的海平面升降变化,第四系浅层经历了复杂的沉积演化。

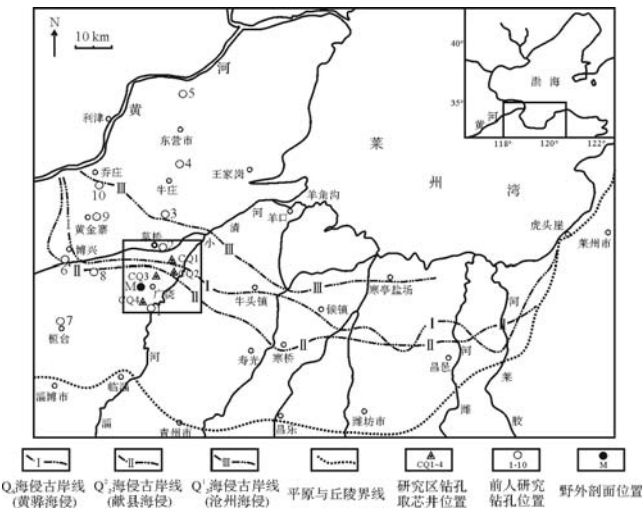


图1 广饶地区地理位置与最大海侵古岸线界线
(据韩有松,1994,资料修改)

Fig.1 The geographical location of the study area and the maximum transgressive paleoshoreline boundaries
(after Han, 1994, modified)

2 钻孔取芯特征

研究区有钻孔取芯井4口(CQ1孔、CQ2孔、CQ3孔全取芯,CQ4孔未完全取芯)和静力触探井88口,采用旋转机械钻机取芯获得岩芯,每10 cm取样测试分析。根据沉积物的粒度测试和微体古生物的鉴定,结合宏观的沉积构造等特征,判别沉积环境。沉积物粒度特征是判别沉积时自然地理环境和水动力条件的良好指标,运用青岛中科院海洋研究所 Master Siz-

er 2000型激光粒度仪测得粒度数据,经处理得到各种粒度参数,判别沉积类型、沉积环境等。微体古生物在中国石油大学(华东)古生物实验室鉴定,微体古生物对生活环境非常敏感,不同的沉积环境具有不同的种属特征,通过分析沉积物中介形虫、有孔虫、轮藻等微体古生物组合特征,恢复海相、陆相沉积环境。同时,借用前人研究的孔2、孔1、孔10资料^[1],进行纵向上沉积相对比分析。研究区CQ1孔、CQ2孔、CQ3孔单井相分析如下:

(1) CQ1孔单井相特征

CQ1孔(37°06′27.5″ N, 118°28′56.9″ E)位于研究区北部小清河附近(图1),钻孔高程+9 m,钻深30 m,取芯率91%,0~2 m为近地表沉积的耕作土,未取芯。该孔整体上以海陆交互作用沉积为主,发育两期海相层,根据钻井取芯岩性综合分析,共划分为9个沉积地层单元(图2):

第1沉积单元,为河流相沉积。埋深2.0~4.7 m,下部发育灰黑色泥,含螺化石,为河漫湖泊沉积;上部以泥质粉砂为主,为河漫滩沉积。

第2沉积单元,为古土壤层。埋深4.7~6.0 m,黄褐色泥,含钙质结核,直径0.5 cm。

第3沉积单元,沉积第一海相层。埋深6.0~6.8 m,下部发育青灰色粉砂,含大量贝壳碎片;上部青灰色泥,贝壳碎片稀少。

第4沉积单元,河流相沉积。埋深6.8~16 m,自下向上由棕黄色细砂、粉砂过渡为黄褐色泥质粉砂、泥和灰黑色泥。由河道滞留沉积向上过渡为边滩沉积、河漫沉积,构成了典型的河流相“二元结构”。

第5沉积单元,为黄土沉积层。埋深16.0~17.0 m,岩性以黄褐色粉砂质泥为主,底部含钙质结核,直径1.0 cm。

第6沉积单元,沉积第二海相层。埋深17.0~23.6 m,以黄褐色粉砂为主,发育贝壳层。

第7沉积单元,河流相沉积。埋深23.6~26.5 m,表现为正粒序,由棕黄色粉砂向上过渡为黄褐色泥质粉砂、泥和灰黑色泥,河流相“二元结构”明显。

第8沉积单元,为风成黄土层。埋深26.5~29.0 m,以棕黄色粉砂质泥、泥为主,含钙质结核,直径1.0 cm。

第9沉积单元,河流相沉积。埋深29.0~30.0 m,底部为棕黄色粉砂,上部发育灰黑色泥沼沉积。

(2) CQ2孔单井相特征

CQ2孔(37°03′51.9″ N, 118°28′32.7″ E)位于研

究区中北部(图 1),高程+12 m,钻深 30 m,取芯率 89%。0~3 m 为近地表沉积,未取芯。根据钻井取芯岩性分析,共划分为 7 个沉积地层单元,仅在中下部发育第二期海相层。具体分析如下:

第 1 沉积单元,古土壤层。埋深 3.0~5.0 m,岩性为棕黄色泥。

第 2 沉积单元地层,河流相沉积。埋深 5.0~7.5 m,上部发育河漫滩沉积,岩性以棕黄色含泥粉砂为主;下部是湖沼沉积,发育黑色泥沼层,可见螺化石。第一海相层海退期,河流进积沉积。

第 3 沉积单元,古土壤层。埋深 7.5~15.0 m,以黄褐色泥、粉砂质泥为主,见少数螺。

第 4 沉积单元,古土壤—风成黄土层。埋深 15.0~19.2 m,上部岩性以棕黄色泥质粉砂为主;下部黄褐色粉砂质泥,含钙质结核。

第 5 沉积单元,第二海相层。埋深 19.2~20.1 m,岩性以泥质粉砂为主,少量贝壳碎片。

第 6 沉积单元,风成黄土—古土壤层。埋深 20.1~25.7 m,上部发育黄褐色粉砂质泥,含钙质结核;下部发育棕黄色泥质粉砂。

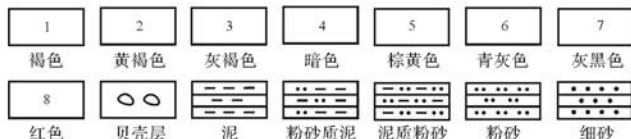
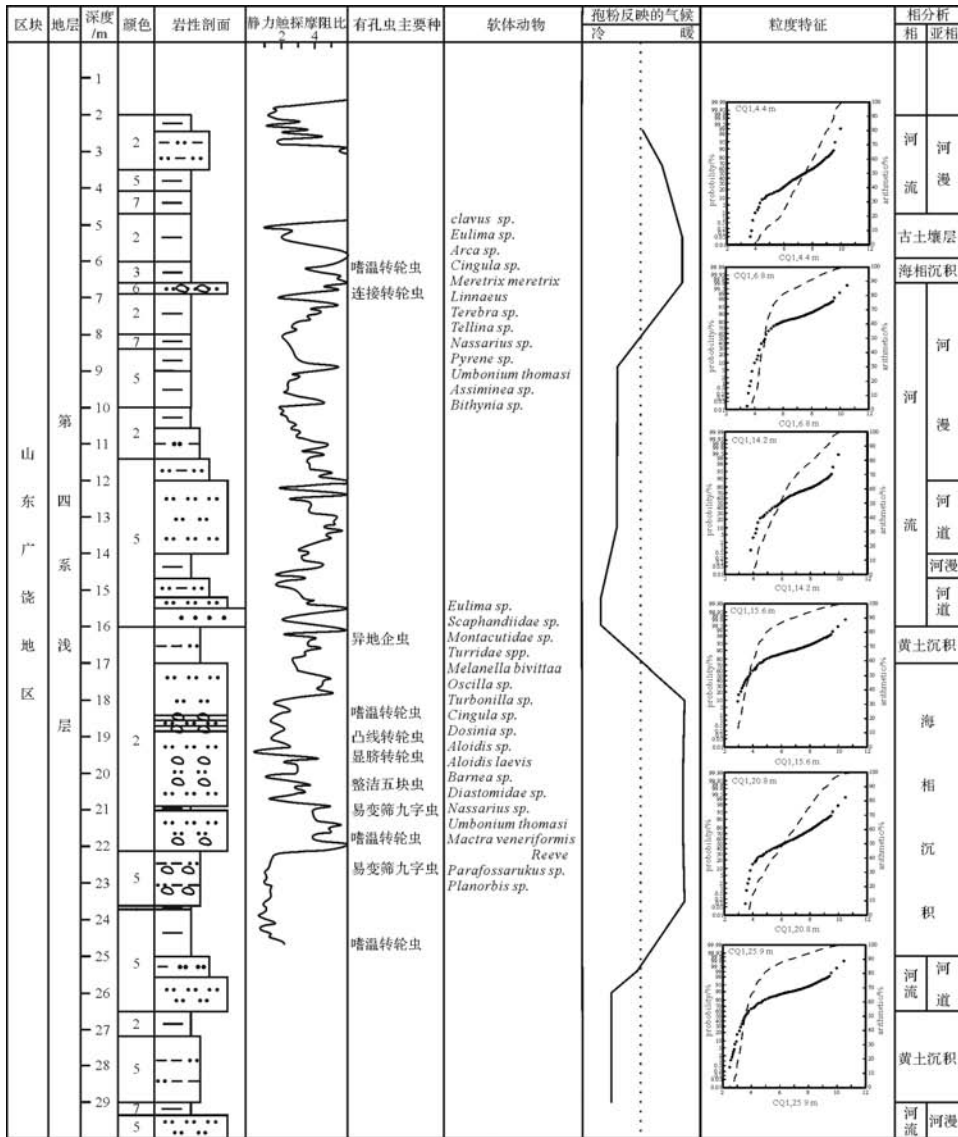


图 2 CQ1 井综合柱状图

Fig.2 The integrated histogram of CQ1

第7沉积单元,风成黄土—古土壤层。埋深25.7~30.0 m,上部发育棕黄色粉砂质泥和黄褐色粉砂质泥,含钙质结核;下部发育棕黄色泥质粉砂。

(3) CQ3孔单井相特征

CQ3孔(37°04′13.9″ N, 118°25′43.3″ E)位于研究区中南部(图1),高程+10 m,钻深30 m,取芯率93%,地表以下0~3.0 m未取芯。根据钻井取芯岩性分析,划分为12个地层单元,以棕黄色、褐黄色的黄土沉积为主,黄土—古土壤旋回沉积为特征,未见海相沉积地层。具体划分如下:

第1沉积单元,近地表黄土层。埋深3.0~3.8 m,以棕黄色、黄褐色泥为主,质地疏松,含红棕色斑块黏土。

第2沉积单元,湖沼沉积。发育灰黑色泥沼层,埋深3.8~4.6 m,岩性灰黑色、灰棕色泥,含少量螺化石。

第3沉积单元,黄土层。埋深4.6~6.5 m,岩性以棕黄色粉砂质泥为主,致密,零星分布黄褐色的黄铁矿质点,5.0 m处发育钙质结核,呈层状分布。

第4沉积单元,泥沼沉积。埋深6.5~7.8 m,灰黑色泥为主,含螺化石,下部灰黑色与棕黄色泥混合沉积。

第5沉积单元,黄土层。埋深7.8~11.0 m,岩性以棕黄色、黄褐色的粉砂质泥、泥为主,在9.0 m和10.8 m分别发育钙质结核,似圆状,直径1~3 cm不等。

第6沉积单元,黄土层。埋深11.0~15.8 m,整体泛黄色,11.0~12.8 m,岩性较粗,疏松,以泥质粉砂、粉砂为主;12.8~15.8 m,岩性细,致密,发育泥和粉砂质泥。

第7沉积单元,古土壤层。埋深15.8~16.2 m,红棕色泥、粉砂质泥为主,发育零散灰白色斑块(未完全固结的钙质结核)。

第8沉积单元,黄土层。埋深16.2~17.5 m,棕黄粉砂质泥,致密坚硬,17.2 m发育钙质结核层。

第9沉积单元,黄土—古土壤层。埋深17.5~22.4 m,整体棕红色,岩性上下分两段:下部,20.0~22.4 m以粉砂质泥、泥为主,质地疏松,含有微小的蜗牛化石和黄褐色的铁质;上部17.5~20.0 m以粉砂、泥质粉砂为主,颜色变深,发育河道沉积的粉砂层。

第10沉积单元,黄土—古土壤层,同上单元,埋深22.4~24.0 m,为黄土—古土壤旋回型沉积层,下部是致密的黄棕色粉砂质泥的黄土沉积,含钙质结

核;上部红棕色的古土壤层,岩性疏松,顶部以粉砂、泥质粉砂为主,属于河道沉积。

第11沉积单元,黄土—古土壤层。同上单元,埋深24.0~27.0 m,底部是含钙质结核的黄土层沉积,向上颜色变深,属古土壤层,顶部发育河道沉积的黄棕色粉砂层。岩性整体向上变粗。

第12沉积单元,河流相沉积。埋深27.0~30.0 m,以黄棕色粉砂和含细沙的粉砂为主,为古河道沉积。

通过对研究区钻井取芯分析,研究区北部小清河附近,地表以下30 m内自上而下发育第一、第二两期海相地层(图2),并向研究区南部逐渐尖灭,到南部过渡为风成黄土沉积。研究区南部的黄土沉积区大致以埋深17.0 m为界分两部分:上部以黄土层沉积为主;下部以黄土—古土壤层旋回型沉积为主,并发育多层河道粉砂。

3 沉积演化

钻孔综合分析得出,研究区北部CQ1与CQ2孔之间存在两期最大海侵古岸线。以古海岸线为界,将研究区自北向南划分为三部分:研究区北部为海陆交互作用沉积区,自上而下发育第一、第二海相层,并在中部、底部沉积黄土层;研究区中部为海向陆过渡区,仅发育第二海相层;研究区南部为黄土沉积区,海侵层完全尖灭,以风成黄土沉积为主,并发育河流相粉砂。

3.1 黄土地层对比与划分

山东黄土沉积范围广泛,从鲁中山麓边缘、山前平原、冲积平原到滨海大陆架都有分布,按自然地理区位可大致分为两大部分,边缘海陆架黄土(滨岸平原与岛屿区)和鲁中山区黄土。山东省第四纪黄土沉积地层,主要划分为大站组和羊栏河组^[18]。大站组,发育黄土层,古土壤层不发育或少发育,在临淄厚7.7 m,青州傅家庄厚3.2 m,由研究区向南部丘陵沉积地层逐渐变薄,在地质年代与黄土高原的马兰黄土相对应,热释光测年在68 000±5 000年~12 927±11 293年之间,为晚更新世玉木冰期沉积。羊栏河组,山东最老的黄土堆积层,发育多层古河道粉砂,以黄土层与古土壤层交替旋回沉积为特征。在青州西南傅家庄黄土热释光年龄为22.7±1.8万年~79.3±6.4万年,属中更新世里斯冰期沉积,沉积年代上可与黄土高原离石黄土进行地层对比^[18]。

研究区黄土沉积物颜色以黄色为基调,主要为灰

黄、棕黄和棕红色,岩性由泥质粉砂和粉砂质泥组成,伴生钙质结核,常见蜗牛化石,垂向上与古土壤交替互层,野外剖面见垂直节理(图 3)。

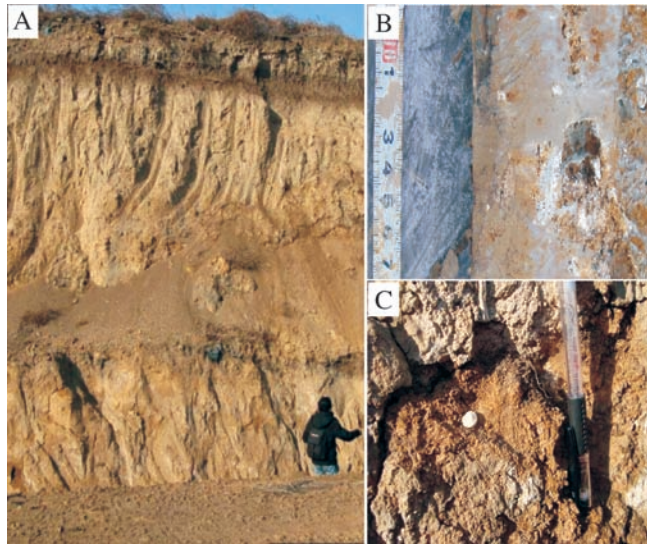


图 3 研究区黄土层野外特征

A.黄土层野外 M 剖面(图 1);B.钙质结核;C.蜗牛化石

Fig. 3 Characteristics of loess layer in field

沉积物粒度特征作为研究较为成熟的指标被广泛应用于风成沉积的研究中^[21],不同沉积成因具有不同的粒度特征。研究区黄土沉积物粒度频率曲线(图 4a)与河流相(图 4b)存在明显的差异,与前人研究成熟的青州黄土^[30]形态接近,粒径在 0~100 μm 之间,曲线呈双峰形,主峰粒度区间在 40~60 μm,次

峰在 1 μm 左右,曲峰分叉且尖锐,具典型的风成沉积特征。研究区黄土沉积物(图 4a)与本文采样测得的青州云门山剖面黄土粒度特征非常相似(图 4c),平均粒径 15~22 μm,两者都比西峰黄土(平均粒径 10~16 μm)^[30]粗,分选差,频率曲线形态(图 4d)也有差异,说明与黄土高原黄土有不同的物源组成。

据钻孔取芯分析,将广饶地区出现的黄土(以 CQ3 孔为例)与前人研究的周边(临淄、青州、临朐、蓬莱)风成黄土进行了对比(图 5)。研究区南部黄土沉积区在 17 m 以下发育多期古河道粉砂层,岩性以粉砂、泥质粉砂为主,并发育多层偏棕红色古土壤层,¹⁴C 测年为中更新世,符合羊栏河组的特征。据此,以 17 m 为界将研究区南部黄土层划分为两部分:5~17 m 为大站组,晚更新世沉积,以粉砂质泥为主,粉砂较少,以发育黄土层为特征;17~30 m 为羊栏河组,未见底,中更新世沉积,岩性以泥质粉砂为主,发育多层古土壤,伴有河道粉砂沉积。

地质历史时期黄土沉积范围比现今所认识的广大的多。不同学者通过对环渤海滨浅海的钻孔研究发现,不同深度也相继沉积含钙质结核的硬黏土质黄土层^[7,16]。同时,通过微体古生物鉴定,在距海侵古岸线较远的 CQ3 孔,埋深 20.5 m 的黄土层发现了半咸水的海相微体古生物 *Zlyocypris* sp.,表明冰期黄土沉积期有海相沉积物的混入。在晚第四纪冰期时期,气候寒冷干燥,末次冰期最盛时,中国东部海平面最大下降到-150~-160 m,海岸线到达朝鲜半岛的东

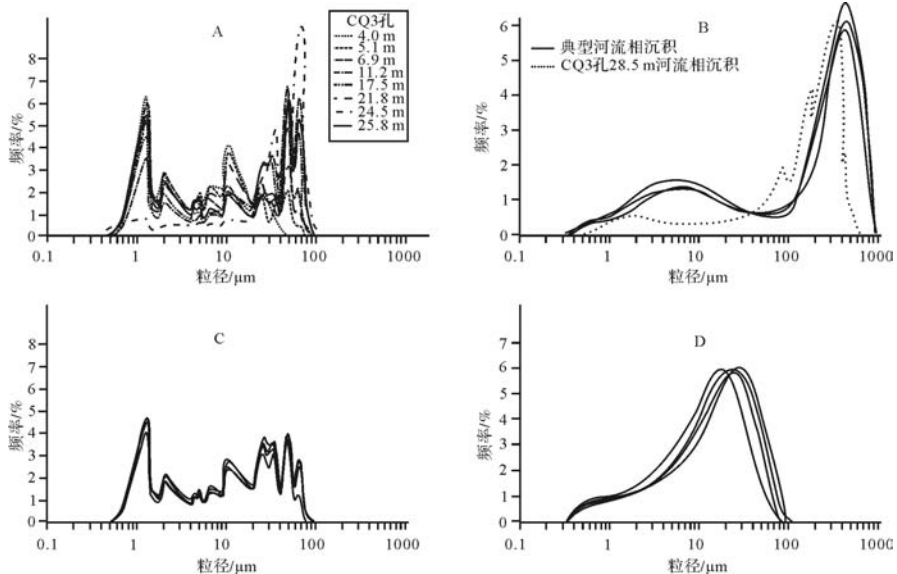


图 4 研究区黄土粒度频率曲线

A.CQ3 孔不同深度样品;B.河流相;C.青州黄土;D.西峰黄土(据彭淑贞,2007)

Fig. 4 The loess grain size frequency curves

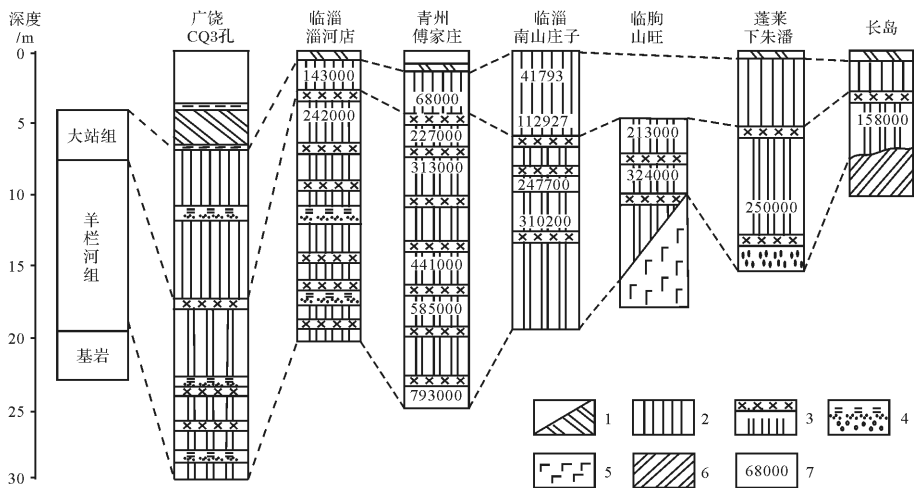


图5 研究区与周边地区黄土地层对比图(据王世进,1999资料修改)

1.坡积层及湖沼层;2.大站组(黄土层);3.羊栏河组(古土壤及黄土层);4.粉砂、砂、砾石层;5.玄武岩;6.基岩;7.热释光法取样点及年龄/a

Fig.5 The loess stratigraphic correlation and classification(after Wang,1999, modified)

侧,整个渤、黄海陆架和东海的部分陆架出露^[13],渤海西、南内陆盛行西北风和偏北风,在冰期强劲的风力作用下,出露的渤海陆架松散沉积物,向陆一侧搬运堆积,并且强劲的北向风所携带的西北高原粉尘,在渤海西、南岸适宜地貌区沉降,经后期改造演化,形成现今的黄土堆积体^[19,30]。

3.2 海侵层对比与划分

渤海西南沿岸海侵的研究,不同学者已在海侵层沉积年代,发育层位,最大古海岸线位置等方面取得了广泛性认识^[3,6,10]。王绍鸿等^[1]对莱州湾南岸平原西侧海侵的研究认为,晚更新世以来发生的两次海侵(献县海侵、黄骅海侵)在最大海侵面时曾分别到达广饶、博兴地区。祁雅丽等^[17]运用地面雷达测试技术,对渤海西南内陆全新世大暖期最大海侵线进行了精确重建,得出的全新世最大海侵古岸线经过广饶研究区北部,与研究区钻井取芯分析所得到的古岸线位置一致(图1)。

研究区北部小清河附近,自上而下发育两期海相层,与黄土层存在鲜明的沉积特征差异。第一海相层,埋深6.0~6.8 m,岩性以青灰色粉砂、泥为主,含大量贝壳碎片;第二海相层,埋深18.0~23.6 m,岩性以青灰色、深褐色粉砂为主,贝壳完整。王绍鸿等^[1]借助1~10孔对莱州湾南岸西侧海相层进行研究,确定了海相层发育的期次、年代、埋深^[1],之后不同的学者进行了证实^[5,17]。其中孔2与研究区CQ1孔距离非常接近(图1),在统一高程下,两孔海相层埋深

相同(图6),在沉积年代上可以认为相同时期的海相地层。以CQ1孔海相层作为研究区的对比标志层,与周边前人研究的黄金寨9孔、乔家庄10孔和牛庄、王家岗地区(图1)的海相地层进行横向对比具有可行性。

从对比中可以看到,研究区第一海相层对应前人研究得出的10~4 ka B.P.的全新世(第I)海侵层,为黄骅海侵沉积;第二海相层对应40~28 ka B.P.的晚更新世晚期(第II)海侵层,为献县海侵沉积。两期海侵层由研究区向现代海岸逐渐增厚,第二海侵层比第一海侵层沉积厚,规模大,经历的演化时间久(图6)。

3.3 两期海侵层沉积特征

晚更新世以来环渤海地区发生的不同期次海侵,在沉积环境、海平面变化、古气候变迁等方面存在明显的差异^[1,3,13-14]。

(1) 第一海侵层特征

广饶地区发育的第一海侵层对应渤海沿岸的第I海侵层,为全新世黄骅海侵沉积。在渤海湾西南沿岸第I海相层分布比较广泛,根据研究区的钻孔分析,并结合前人研究^[1,5,23],最大古海岸线大致分布于乔庄、博兴、草桥、牛头镇、南河、侯镇、永安、李家埠、夏店及新河一带(图1)。其海侵范围比晚更新世早期的沧州海侵要大,比晚更新世中期的献县海侵要小,在莱州湾南岸平原东部地区,全新世的海侵范围比晚更新世中期的要大。

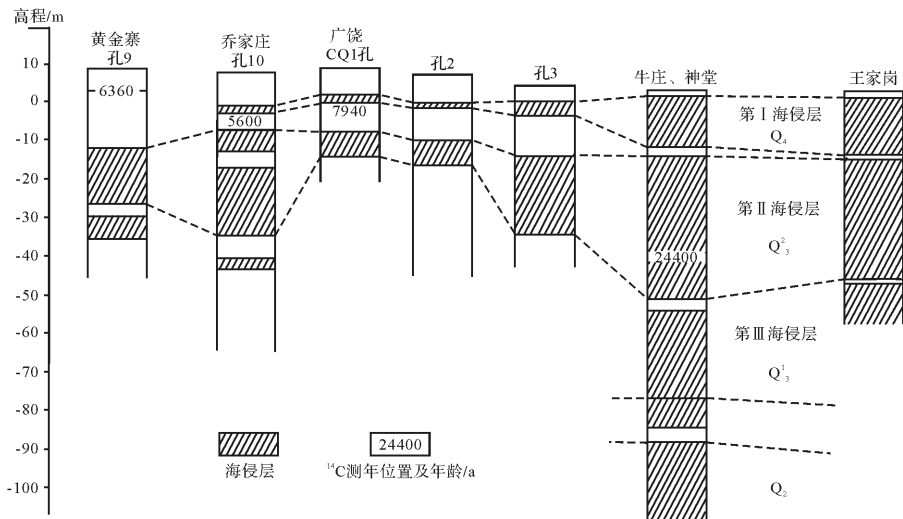


图6 研究区与周边地区海侵地层对比图(据韩有松,1994;王绍鸿,1979资料修改)

Fig. 6 The transgression stratigraphic correlation and classification
(modified after Han, 1994; Wang, 1979)

根据最大海侵古岸线海侵层位埋深,暂不考虑构造沉降和沉积压实等引起的地层沉降,取芯资料显示,研究区第一海侵层最大海侵面的高程为2.0~2.5 m,这与众多学者研究所认为的全新世海侵存在2.0~3.0 m的高海平面的结论相吻合^[11]。可以看出,全新世海侵以来,区域构造运动趋于稳定,没有发生明显的地层沉降。

通过研究区钻孔取样微体古生物的鉴定,结合1~10钻孔^[1]分析(图1),全新世黄骅海侵沉积环境主要以水深小于15 m的潮间带—浅海为主。其中第一海侵层有孔虫化石群较多的五种是:嗜温转轮虫(*Ammonia tepida* Cushman)、连接转轮虫(*Ammonia annectens* Parker and Jones)、显脐转轮虫(*Ammonia flevensis* Hofker)、圆形短五块虫(*Quinqueloculina akneriana* rotunda Gerke)、易变筛九字虫(*Cribronion in-certum* Williamson),这些有孔虫在现代渤海海洋环境中主要生活在水深小于20 m的水域。而且,第一海侵层中45%的软体动物化石群以潮间带种为主,浅海种最少,只占10%^[1,15,26]。

(2) 第二海侵层特征

研究区第二海侵层与环渤海沿岸献县(第II)海侵层相对应,为距今4.2~2.8万年间晚更新世中期海侵沉积。该海相层分布范围广泛,经钻孔证实,在渤海西南沿岸古海岸线大致从乔庄西侧,向南经博兴,过研究区广饶县以北,向东一直延伸到寿光寒桥和昌邑,至新河、灰埠北和虎头崖附近^[1,5](图1)。

根据海侵层在研究区最大海侵古岸线位置埋深,第二海侵层最大海侵面的现代标高是-14.6~-8.0 m。事实上,晚更新世以来的区域构造沉降对海侵层的埋深具有直接的影响。魏灵等利用渤海沿岸众多钻孔微体生物化石的组合特征来恢复海水深度,重建40~28 ka B.P. 献县海侵最大海侵面的现代标高是-11.0~-5.0 m^[11],与研究区第二海侵层的最大海平面现代标高相差3.6~3.0 m。可见,自晚更新世中期第二海侵层沉积以来,受构造沉降和沉积压实作用,地层沉降了约3.0 m。

在古生物学特征上,研究区第二海侵层有孔虫化石群较多的五种是:嗜温转轮虫、易变筛九字虫、缝裂企虫(*Elphidium mangellanisum* Heron-Allen and Earland)、整洁五块虫(*Quinqueloculina bellatula* Bandy)、异地企虫(*Elphidium advenum* Cushman),这些有孔虫主要生活在水深15~25 m的浅海区。在软体动物化石群上,第二海侵层与第一层海侵层正相反,浅海物种最多,占总种数的34%,潮间带物种最少,占23%^[1,15,26]。可见,第二海侵层以水深10~20 m的滨岸浅海环境为主,比第一海侵层沉积水体要深,海侵幅度更大,演化持续时间更久。

3.4 沉积演化模式

研究区地表以下30 m内,存在两期最大海侵的古岸线,以古岸线为界,南部以风成黄土沉积为主,北部发育两期海相层(黄骅海侵、献县海侵)。晚第四纪冰期时期,偏北风所携带的西北内陆干旱地区和裸

露的边缘海陆架的沙尘,在山地丘陵,山前平原及渤海西南沿岸适宜位置沉降,形成大面积黄土堆积带。间冰期气温回升,海平面上升,发生海侵事件,侵蚀改造前冰期黄土。

晚更新世发育的 36 ka B.P. 献县海侵,在最大海侵面时到达研究区,侵蚀、超覆于中更新世羊栏河组黄土层之上,沉积第二海侵层。之后,进入晚更新世末次冰期最盛时期(玉木 III 冰期),沉积大站组黄土。伴随最后一次冰期结束,转入全新世大暖期,发生了黄骅海侵,侵蚀大站组黄土,并沉积第一海侵层,再次经历了黄土—海侵沉积旋回。

在垂向上,两期海侵层与黄土—古土壤层呈叠置互层关系,海侵层穿插超覆于南部的黄土层中,与黄土层呈不等时沉积接触(图 7)。在莱州湾南岸平原黄土层被海侵侵蚀,形成海蚀黄土崖,称为“黄土阜”,呈带状沿海岸线分布^[19,22]。

海侵的侵蚀改造作用对于山东省黄土分布格局和沉积演化具有重要影响。间冰期海侵侵蚀冰期黄土,在最大海侵位置沉积了海侵黄土的古岸线,使山东省近地表黄土分布的北缘与全新世最大海侵古岸线的界线相一致。

笔者把这种海侵沉积地貌称为“上超型海蚀黄土古岸线”。其含义是,间冰期气候回暖,海平面上升,渤海陆架及内陆平原黄土沉积区发生海侵剥蚀作用,造成海侵侵蚀上超于先前冰期沉积的较老黄土层之上,在最大海侵位置形成了海侵黄土古岸线的演化模式(图 7)。

4 古气候演变

研究区海侵、黄土的沉积演化与晚第四纪以来的古气候变化、古环境变迁息息相关。晚第四纪全球气候变化频繁,出现多次冰期与间冰期的气候冷暖旋

回,这种气候的旋回性变化在我国晚第四纪古里雅冰芯氧同位素记录、渤海钻孔古地磁和海侵研究中都有相应体现^[13-14,20,28]。苍树溪等^[2]对渤海湾西岸中更新世以来古生态、古气候、古地理的研究认为,布伦赫斯正极性世(距今大约 69 万年)以来,发生的五次短期地磁极倒转事件与大约以 10 万年为周期的古气候摆动,微体古生物组合更替等相对应。

古气候波动的周期性在末次冰期和全新世存在千年和百年尺度的变化周期^[13-14],并具有“旋回加旋回”的特点^[24,27,29]。海侵演化过程中的表现是,在长周期的海平面升降变化中,叠加了中短期的海平面波动,即长周期的海退存在短周期的海侵。学者对渤海湾海侵的研究已证实,在全新世大暖期海侵事件的海退期,有短时期的海侵发生^[13-14]。

晚第四纪气候演变是个非常复杂的问题,是多种因素综合作用的结果。根据研究区海侵与黄土沉积演化关系(图 2),对应不同的沉积演化特征,结合渤海沿岸古气候变化特征^[1,6,14,27],将研究区晚更新世以来的气候演变划分为 6 个时期,具体划分如下:

(1) 干冷期,对应玉木 II 冰期,海平面下降,侵蚀基准面下降,发育深切河流,在干冷季风下沉积羊栏河组黄土,埋深-17 m 以下。

(2) 温暖湿润期,为玉木冰期上亚间冰期,气候回暖,海平面上升,发育献县海侵,在最大海侵面时到达研究区,侵蚀改造前期黄土;同时,由于侵蚀基准面的上升,河流动力较弱,流水不畅,伴随湖沼相沉积,埋深-17~-9 m。

(3) 干冷偏凉期,对应玉木 III 冰期,气候转冷,但平均气温比玉木 II 冰期略高些,海平面最大下降到-100 m 以下,渤海、黄海陆架裸露,在风力作用下沉积大站组黄土;河流相在研究区发育较弱,埋深-9~+1 m。

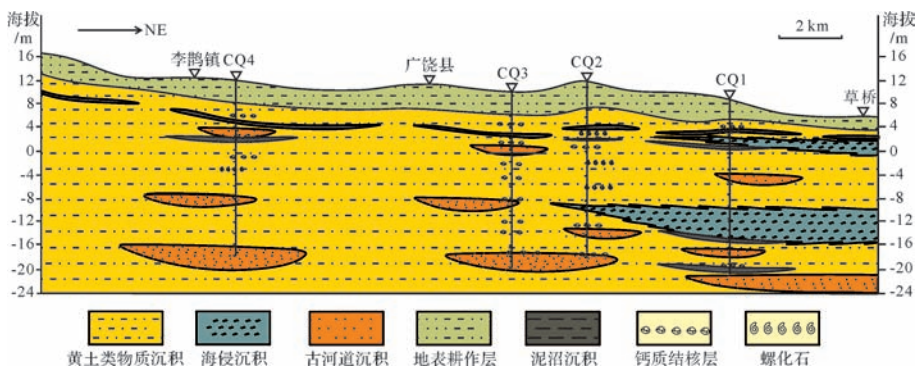


图 7 研究区海侵、黄土沉积演化模式

Fig.7 The deposition evolution model of transgressions and loess

(4) 温暖期,进入全新世,气候转暖,发育黄骅海侵,侵蚀大站组黄土;由于流路不畅,河流动力较弱,湖沼相发育广泛,埋深+1~+2 m。

(5) 潮湿湿润期,海侵后退期,伴随陆上水位基准线下降,在先期海侵的低洼地带淤积成湖,发育大面积湖沼沉积,覆盖在研究区南部大站组黄土和北部第一海侵层之上,¹⁴C 测年 3 000 a B.P.左右,埋深+2~+3 m。

(6) 现代期,与近代气候相近,受人类活动影响较大,一般地表以下 2 m 或 3 m。

5 结论

(1) 研究区地表以下 30 m 内,南部沉积风成黄土,北部发育两期海相层(10~4 ka B.P.的黄骅海侵层和 40~28 ka B.P.的献县海侵层),侵蚀上超于南部的黄土层中,在渤海西南岸内陆平原形成“上超型海蚀黄土”的演化模式。

(2) 对研究区钻孔取芯研究证实,40~28 ka B.P.的献县海侵最大海侵界线并没有越过广饶县城,而是位于广饶县城以北,草桥、小清河以南,对此进行了确定(图 1)。

(3) 研究区第一海侵层存在海拔 2~3 m 的高海侵面,但第二海侵层以水深 10~20 m 的滨岸浅海环境为主,比以潮间带—浅海沉积环境为主的第一海侵层沉积水体要深,海水陆泛的幅度更大,持续时间更久。

(4) 根据研究区海侵与黄土的沉积演化特征,将研究区晚更新世以来的气候演化划分为 6 个阶段:干冷期—温暖湿润期—干冷偏凉期—温暖期—潮湿湿润期—现代期,分别对应海侵与黄土演化的不同气候类型。

但是,关于两次海侵的争论远没有停止。前人对环渤海沿海岸海侵研究也发现^[2,11],40~28 ka B.P.的献县海侵比 10~4 ka B.P.的黄骅海侵,海水陆泛的幅度更大,海水更深,与本研究得出的结论一致。但与全球气候处于末次冰期的间冰阶,冰川部分消融的观点不切合。研究区海侵与黄土的时空沉积演化关系仅是环渤海地区古气候演变的物质载体,而且影响两期海侵古气候变化差异性的原因是多因素的,今后还应从构造沉降差异,区域气候波动差异,古地貌,古地理和古环境等进行更加深入的多角度研究。

致谢 对参加野外工作的张光德、徐钰、李帅、晋同杰等同志,和样品测试中给予热忱帮助的青岛中科

院海洋研究所,在此一并致谢。

参考文献 (References)

- 1 王绍鸿. 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, 1979, 10(1): 9-23. [Wang Shaohong. A preliminary study of marine bed and its depositional conditions in Late Quaternary off the west coast of Laizhou Bay [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1979, 10(1): 9-23.]
- 2 苍树溪, 赵松令, 张宏才, 等. 渤海湾西岸中更新世以来古生态、古气候、古地理 [J]. 古生物学报, 1979, 18(6): 579-591. [Cang Shuxi, Zhao Songling, Zhang Hongcai, et al. Middle Pleistocene paleoecology, paleoclimatology and paleogeography of the western coast of Pohai Gulf [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1979, 18(6): 579-591.]
- 3 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究 [J]. 地质学报, 1981(1): 1-13. [Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua, et al. Strata of Quaternary transgressions in East China: a preliminary study [J]. Acta Geologica Sinica, 1981(1): 1-13.]
- 4 赵松龄, 杨光复, 苍树溪, 等. 关于渤海湾西岸海相地层与海岸线问题 [J]. 海洋与湖沼, 1978, 9(1): 15-25. [Zhao Songling, Yang Guangfu, Cang Shuxi, et al. On the marine stratigraphy and coastlines of the western coast of the Gulf of Bohai [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1978, 9(1): 15-25.]
- 5 韩有松, 孟广兰, 王少青. 渤海莱州湾滨海平原晚第四纪地质事件与古环境 [J]. 海洋科学集刊, 1994, 35: 87-96. [Han Yousong, Meng Guanglan, Wang Shaoqing. The geological events and paleo-environment of the coastal plain of Laizhou Bay in Bohai Sea during Late Quaternary [J]. Studia Marina Sinica, 1994, 35: 87-96.]
- 6 施雅风, 于革. 40~30ka B.P. 中国暖湿气候和海侵的特征与成因探讨 [J]. 第四纪研究, 2003, 23(1): 1-11. [Shi Yafeng, Yu Ge. Warm-humid climate and transgressions during 40~30ka B.P. and their potential mechanisms [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(1): 1-11.]
- 7 赵长荣, Hus J, 阎玉忠, 等. 渤海湾西岸晚更新世—全新世年代地层序列与地磁极漂移 [J]. 地质调查与研究, 2003, 26(3): 183-192. [Zhao Changrong, Hus J, Yan Yuzhong, et al. Late Pleistocene-Holocene chronostratigraphic sequence and the geomagnetic polar excursion on the west coast of Bohai Bay [J]. Geological Survey and Research, 2003, 26(3): 183-192.]
- 8 陈永胜, 王宏, 裴艳东, 等. 渤海湾西岸晚第四纪海相地层划分及地质意义 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(3): 747-759. [Chen Yongsheng, Wang Hong, Pei Yandong, et al. Division and its geological significance of Late Quaternary marine sedimentary beds in the west coast of Bohai Bay, China [J]. Journal of Jilin University: Edition of Earth Science, 2012, 42(3): 747-759.]
- 9 胥勤勉, 袁桂邦, 张金起, 等. 渤海湾沿岸晚第四纪地层划分及地质意义 [J]. 地质学报, 2011, 85(8): 1352-1367. [Xu Qinqian, Yuan Guibang, Zhang Jinqi, et al. Stratigraphic division of the Late Quaternary strata along the coast of Bohai Bay and its geology significance [J]. Acta Geologica Sinica, 85(8): 1352-1367.]
- 10 薛春江. 7000 年来渤海西岸、南岸海岸线变迁 [J]. 地理科学, 2009, 29(2): 217-222. [Xue Chunting. Historical changes of coast-

- lines on west and south coasts of Bohai Sea since 7000 a B. P. [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(2): 217-222.]
- 11 魏灵,贾玉连,易朝路,等. 近4万年渤海西岸海侵时古海面的现代标高对比研究[J]. 第四纪研究,2006,26(3):361-369. [Wei Ling, Jia Yulian, Yi Chaolu, et al. Comparison study of elevations of ancient sea level during transgressions of the west coast of Bohai Sea in the past 40ka[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(3): 361-369.]
 - 12 王强,田国强. 中国东部晚第四纪海侵的新构造背景[J]. 地质力学学报,1999,5(4):41-48. [Wang Qiang, Tian Guoqiang. The neotectonic setting of Late Quaternary transgressions on the eastern coastal plain of China[J]. *Journal of Geomechanics*, 1999, 5(4): 41-48.]
 - 13 田明中,程捷. 第四纪地质学与地貌学[M]. 北京:地质出版社,2009. [Tian Mingzhong, Cheng Jie. *The Quaternary Geology and Geomorphology*[M]. Beijing: Geology Press, 2009.]
 - 14 徐海. 中国全新世气候变化研究进展[J]. 地质地球化学,2001,29(2):9-16. [Xu Hai. Advance in research on the Holocene climate fluctuations[J]. *Geology-Geochemistry*, 2001, 29(2): 9-16.]
 - 15 汪品先. 微体化石在海侵研究中的应用与错用[J]. 第四纪研究,1992,12(4):321-331. [Wang Pinxian. The use and misuse of microfossils in marine transgression studies [J]. *Quaternary Sciences*, 1992, 12(4): 321-331.]
 - 16 施林峰,翟子梅,王强,等. 从天津CQJ4孔探讨中国东部海侵层的年代问题[J]. 地质论评,2009,55(3):375-384. [Shi Linfeng, Zhai Zimei, Wang Qiang, et al. Geochronological study on transgression layers of the CQJ4 borehole at Dagang area in Tianjin, China [J]. *Geological Review*, 2009, 55(3): 375-384.]
 - 17 祁雅莉. 渤海西南岸全新世大暖期最大海侵线重建[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2013. [Qi Yali. Paleo-shoreline reconstruction in Mid-Holocene transgression, the south-western coast of Bohai[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.]
 - 18 王世进,张成基,刘海坤,等. 山东省第四纪地质研究新进展[J]. 山东地质,1999,15(2):1-8. [Wang Shijin, Zhang Chengji, Liu Haikun, et al. Advances on the quaternary geological study in Shandong province[J]. *Geology of Shandong*, 1999, 15(2): 1-8.]
 - 19 张祖陆,辛良杰,聂晓红. 山东地区黄土研究综述[J]. 地理科学,2004,24(6):746-752. [Zhang Zulu, Xin Liangjie, Nie Xiaohong. A summary of loessial researches in Shandong[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(6): 746-752.]
 - 20 威廉斯. 第四纪环境[M]. 刘东生译. 北京:科学出版社,1997. [Williams M A J. *The Quaternary Environment*[M]. Translated by Liu Tunsheng. Beijing: Science Press, 1997.]
 - 21 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京:科学出版社,1985:1-408. [Liu Tunsheng. *The Loess and the Environment*[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-408.]
 - 22 张祖陆. 渤海莱州湾南岸平原黄土旱地貌及其古地理意义[J]. 地理学报,1995,50(5):464-470. [Zhang Zulu. Loess mounds on the Laizhou Bay ptain south of Bohai Sea and their paleogeographic implication[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50(5): 464-470.]
 - 23 庄振业,许卫东. 渤海南岸6000年来的岸线演变[J]. 青岛海洋大学学报,1991,21(2):99-110. [Zhuang Zhenye, Xu Weidong. The coastline evolution on the south coast of the Bohai Sea since 6ka B. P. [J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1991, 21(2): 99-110.]
 - 24 Miall A D. *Principles of Sedimentary Basin Analysis* [M]. 2nd ed. New York: Springer, 1990: 1-223.
 - 25 徐明广. 引黄济青工程沿线浅层第四系沉积相和沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质,1988,8(2):113-117. [Xu Mingguang. Quaternary shallow sedimentary facies and environment along the workline of "Diversion from the Huanghe River for watering Qingdao" [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1988, 8(2): 113-117.]
 - 26 夏东兴,王德邻,吴桑云,等. 鲁北沿岸贝壳堤的地质学意义[J]. 黄渤海海洋,1991,9(3):19-24. [Xia Dongxing, Wang Deling, Wu Sangyun, et al. The geological significance of the cheniers along the coast of northern Shandong province [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1991, 9(3): 19-24.]
 - 27 Demon G H, Karlén W. Holocene climatic variations—their pattern and possible cause[J]. *Quaternary Research*, 1973, 3(2): 155-205.
 - 28 Ko-chen C. A preliminary study on the climatic fluctuations during the last 5000 years in China[J]. *Scientia Sinica*, 1973, 16(2): 226-256.
 - 29 Chappell J, Shackleton N J. Oxygen isotopes and sea level[J]. *Nature*, 1986, 324(6093): 137-140.
 - 30 彭淑贞,高志东,吴秀平,等. 山东青州地区黄土的粒度组成及成因分析[J]. 地质力学学报,2007,13(4):315-321. [Peng Shuzhen, Gao Zhidong, Wu Xiuping, et al. Grain-size distribution and genesis of loess in the Qingzhou area, Shandong[J]. *Journal of Geomechanics*, 2007, 13(4): 315-321.]

Depositional Evolution and Paleoclimate Changes Since Late Pleistocene in Guangrao Area, Shandong Province

YANG JianPing¹ PANG XiaoLin^{1,2} WANG HaiFeng³ JIA JunTao¹ LIU Ling⁴

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Shandong Zhengyuan Geophysical Information Technology Limited Company, Jinan 250101, China;

3. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China;

4. School of Energy Resource, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Influenced by transgressions, the shallow strata of Quaternary has a complicated sedimentary evolution in Guangrao area, the inland of Southwest Bohai Sea since Late Pleistocene. Below the surface of 30 meters, it mainly deposits loess in the south of the area, while in the north of the area, it mainly deposits two marine layers, which were respectively named the first transgression layer and the second transgression layer. The first transgression layer is Huanghua transgression layer of 10~4 ka B.P., while the second transgression layer is Xianxian transgression layer of 40~28 ka B.P. According to 4 drilling coring Wells and 88 static sounding wells studied the transgression evolution and loess of the area by using modern test methods (particle size analysis, heavy mineral analysis, ¹⁴C dating, geochemical tests) and stratigraphic correlation. The loess layer deposited in late Pleistocene, and can be divided into Dazhan formation and Yanglanhe formation in the south of area on the depth boundary of 17 meters. It had two transgression events (Huanghua transgression and Xianxian transgression) since late Pleistocene and came to the area in the maximum transgression time. Because of the erosion and modification of the two transgressive events, it had formed the transgressive evolution model of "transgression overlap the loess". According to the paleoclimate change which math to transgression and loess deposition evolution, climate change of the area can be divided into six periods since Late Pleistocene, including cold dry climate, warm humid climate, cold dry but slants cool climate, warm climate, moist climate and modern climate. Different type of climate corresponds to different feature of sedimentary evolution.

Key words: Guangrao area; Late Pleistocene; transgression and loess; depositional evolution; paleoclimate changes