

文章编号: 1000-0550(2014)02-0260-10

# 敞流沉积环境中“浅水三角洲前缘砂体体系”研究<sup>①</sup>

张新涛 周心怀 李建平 牛成民

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海油田勘探开发研究院 天津 300452)

**摘要** 新近纪渤海湾盆地具有构造稳定、沉降缓慢、地形平缓、坡度小等特点;古气候资料证实渤海海域新近纪中期(明下段沉积时期)湿润亚热带到暖温带气候,广泛发育浅水三角洲及浅水湖泊沉积。应用层序地层学原理将黄河口凹陷新近纪明下段划分为 1 个三级层序、3 个体系域,即低位域、湖侵域、高位域,识别出不同体系域内拼合板型、孤立型、席状型三种砂体结构,分别对应分流河道型、砂坝型及席状型浅水三角洲类型。同时借鉴现代浅水沉积、水槽实验模拟研究,探讨浅水三角洲沉积演化过程中砂体分布规律与湖平面相对变化之间响应关系,最终建立了黄河口凹陷新近纪明下段温凉型、湿热型两种浅水三角洲层序成因模式,认为古气候影响的湖平面相对变化控制了浅水三角洲前缘砂体的微相类型、结构及分布。

**关键词** 敞流沉积 河控浅水三角洲 现代沉积 水槽实验 沉积模式

**第一作者简介** 张新涛 男 1978 年出生 博士 工程师 油气勘探研究 E-mail: zxt198108@163.com

**中图分类号** TE122.2 TE121.3 **文献标识码** A

Fisk 最早将河控三角洲分为深水型及浅水型三角洲<sup>[1]</sup>, Postma 将低能盆地中的三角洲分为浅水三角洲及深水三角洲两大类,共识别出 8 种浅水三角洲端元<sup>[2]</sup>。近年来,浅水沉积背景下“浅水三角洲前缘砂体体系”成为研究热点之一。尤其是浅水三角洲前缘砂体的形成动力学、微相构成及内部结构等多个方面<sup>[3-7]</sup>。Bryan *et al.*<sup>[8]</sup>利用数值模拟方法对浅水三角洲前缘砂体沉积微相变化进行研究,指出古气候、古构造背景及湖平面变化控制了浅水三角洲前缘砂体形成、分布;Nichols<sup>[9]</sup>对浅水三角洲前缘砂体中分流河道体系的结构、相类型及沉积过程演化进行探讨,证实了基准面变化影响河流—浅水三角洲沉积体系的几何形态和结构;而传统意义浅水三角洲前缘砂体体系受河道控制作用,通常被描述为厚度大、分布窄、分支河道富砂,河道间贫砂特征,与陆架边缘密西西比鸟足状三角洲类型差异较大<sup>[9-12]</sup>。

勘探证实,大型拗陷湖盆浅水三角洲前缘砂体是油气藏勘探的重要目标,深入系统研究湖盆浅水三角洲前缘砂体的形成机制、发育类型与分布规律,对于油气勘探具有重要意义<sup>[13-16]</sup>。渤海南部海域黄河口凹陷新近系油气勘探近年来取得突破,相继发现了渤中 25-1S、渤中 28-34 等浅水三角洲储层砂体的大中型油田,共获得油气储量近 5 亿方,是

渤海油田近年来油气勘探亮点之一。许多学者对黄河口凹陷新近系明下段油气聚集规律,成藏模式方面做了很多研究工作<sup>[17-20]</sup>。但新近系明下段层序格架的建立、体系域的划分及层序模式研究程度相对薄弱,尤其该时期浅水三角洲前缘砂体成因类型多样、砂体相变快,垂向、横向上难以追踪对比,缺乏成因研究。本文将在系统调研国内外最新研究进展的基础上,结合鄱阳湖等现代湖泊砂体的分布特征,开展浅水三角洲前缘砂体分布实验模拟研究,剖析黄河口凹陷浅水三角洲的形成条件与前缘砂体的成因类型,明确浅水三角洲发育的地质背景,建立敞流沉积环境下浅水三角洲前缘砂体分布模式,探讨浅水三角洲储层油气藏分布特征与油气潜力,指导下一步油气勘探。

## 1 浅水三角洲沉积背景

### 1.1 古地理背景

渤海海域新近纪具有构造稳定、沉降缓慢、内部无分割、地形平缓、坡度小等特点。传统研究认为渤海海域以河流相沉积,局部发育有小规模、分隔的滨浅湖沉积,陆上沉积总体以山麓洪积相、冲积平原—河流平原相粗碎屑岩为主<sup>[21]</sup>。近年研究表明,渤中凹陷为新近纪时期渤海湾盆地沉积沉降中心,是陆源碎屑物质最终的归宿(图 1)。该区存

<sup>①</sup>国家重大科技专项“近海隐蔽油气藏勘探技术”(编号:2011ZX05023-002)资助  
收稿日期:2013-07-31;收修改稿日期:2013-10-24

在湖泊发育的直接和间接证据,如丰富的淡水湖泊生物化石、低的砂岩含量等。并以砂岩含量为依据对湖泊发育区进行了初步预测,表明湖泊面积较前人预测有所扩大。而在对沉积层序分析后,更发现了浅水三角洲沉积。

一般来说,表面波浪受水底地形强烈影响的水深范围为浅水区,通常以表面波浪波长的1/2作为浅水区的下限深度,即浪基面以上为浅水区。按照浅水的概念,湖盆中可将浪基面之上的滨、浅湖区定为浅水区。湖浪大小与湖泊规模有关,如密执安湖最大波浪的波长约为30 m,现代湖泊浪基面通常不超过20 m。现代洞庭湖、鄱阳湖浅水湖泊的枯水期、洪水期平均水深为6.3~8.4 m,最大水深23.5~25.1 m,湖泊面积为2 625~3 283 km<sup>2</sup>,与黄河口凹陷新近纪时期发育面积相当(大约为2 570 km<sup>2</sup>),推测其黄河口凹陷浅水深度为6~9 m。

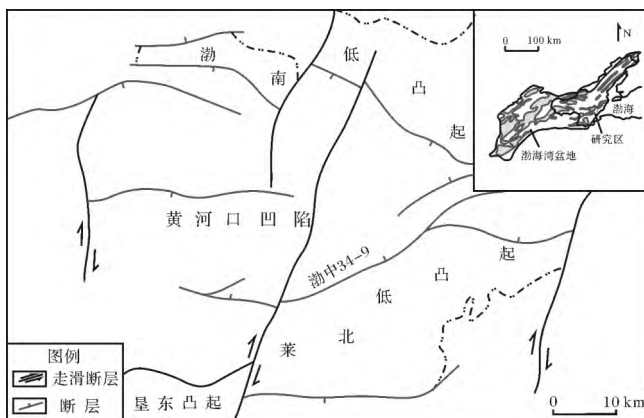


图1 黄河口凹陷位置及构造图

Fig.1 Location and structural map of Huanghekou sag

## 1.2 古气候

湖泊对气候转变时期的响应尤为敏感,进而影响基准面变化和可容纳空间变化<sup>[22, 23]</sup>。孢粉资料是较易获得并能反映地质时期气候变化的直接证据,孢粉组合的纵向变化反映了古气候的变化与沉积环境的变迁<sup>[24]</sup>。黄河口凹陷明下段沉积时期植被以较湿润的热带亚热带植物组合为主,如枫香粉属、伏平粉属、榆粉属、菱粉属、粗肋孢属、水龙骨单缝孢属、罗汉松粉属、铁杉粉属等。从区域上看,渤海海域新近纪气候变化是早期(馆陶组沉积时期)的暖温带—中期(明下段沉积时期)的湿润亚热带到暖温带—晚期(明上段沉积时期)的温带气候<sup>[23, 25]</sup>。黄河口凹陷明下段沉积时期正是气候的转变时期,明下段中下部是水生及喜湿分子进入繁

盛期,说明湖泊扩张,水域相对较广。

## 2 明化镇组层序格架下砂体分布特征

在陆相沉积盆地中,由于构造运动、气候、湖平面的变化及沉积物供给速率等因素形成了若干个沉积间断、不整合以及不整合可对比的整合面,这些界面将地层分成了相对整一且具有成因联系的等时地层格架<sup>[26, 27]</sup>。根据岩芯、钻测井和三维地震剖面反射特征,通过井震标定,对研究区内明化镇组下段层序界面进行识别,划分为1个三级层序、识别出低位体系域、湖侵体系域及高位体系域。

### 2.1 层序识别标志

黏土矿物标志。黏土矿物广泛分布于地表,其组合及含量的变化记录了物源区古气候、古环境变化的信息,赖维成等<sup>[24]</sup>利用明下段伊利石的相对低含量带与孢粉指示的湿热气候有很好的对应关系,建立了伊利石与古气候之间的对应关系。黄河口地区明下段埋深小于1 500 m,属于早成岩阶段B期,成岩作用对伊利石含量的影响不大,代表风化作用的产物,更具有指示气候变化的作用。从图2可以看出, K16-A井明下段伊利石的相对低含量带与孢粉指示的湿热气候有很好的对应关系,伊利石的相对高含量带与孢粉指示的相对干凉气候也有很好的对应关系。另外,该井明下段高岭石含量降低也指示了气候变干凉的过程。

测井相标志。黄河口地区明下段底部黏土矿物呈现高GR值特征。GR值呈现几个阶梯状变化带,这种旋回性变化与黏土组分、孢粉反映的古气候变化都具有很好的对应关系。反映不同气候条件下黏土矿物相对含量。蒙皂石对放射性元素的吸附也会在一定程度上影响GR值的变化。因此,综合孢粉、藻类资料、黏土矿物响应和GR值响应可以作为层序划分的可靠标志。

地震相标志。馆陶组与明化镇组时期地震相差异较大,馆陶组地震相表现为中频弱振幅、空白反射;而明化镇组下段表现为短轴状、中强振幅反射特征,在凸起区局部可见低幅削蚀、超覆特征。明化镇组不同时期地震相差异明显。下部表现为短轴状、中强振幅反射特征;中部为连续强振幅平行反射特征;上部为孤立的中强振幅反射特征。

### 2.2 体系域划分及特征

#### 2.2.1 体系域划分

体系域为同期沉积体系的组合,是构成层序的

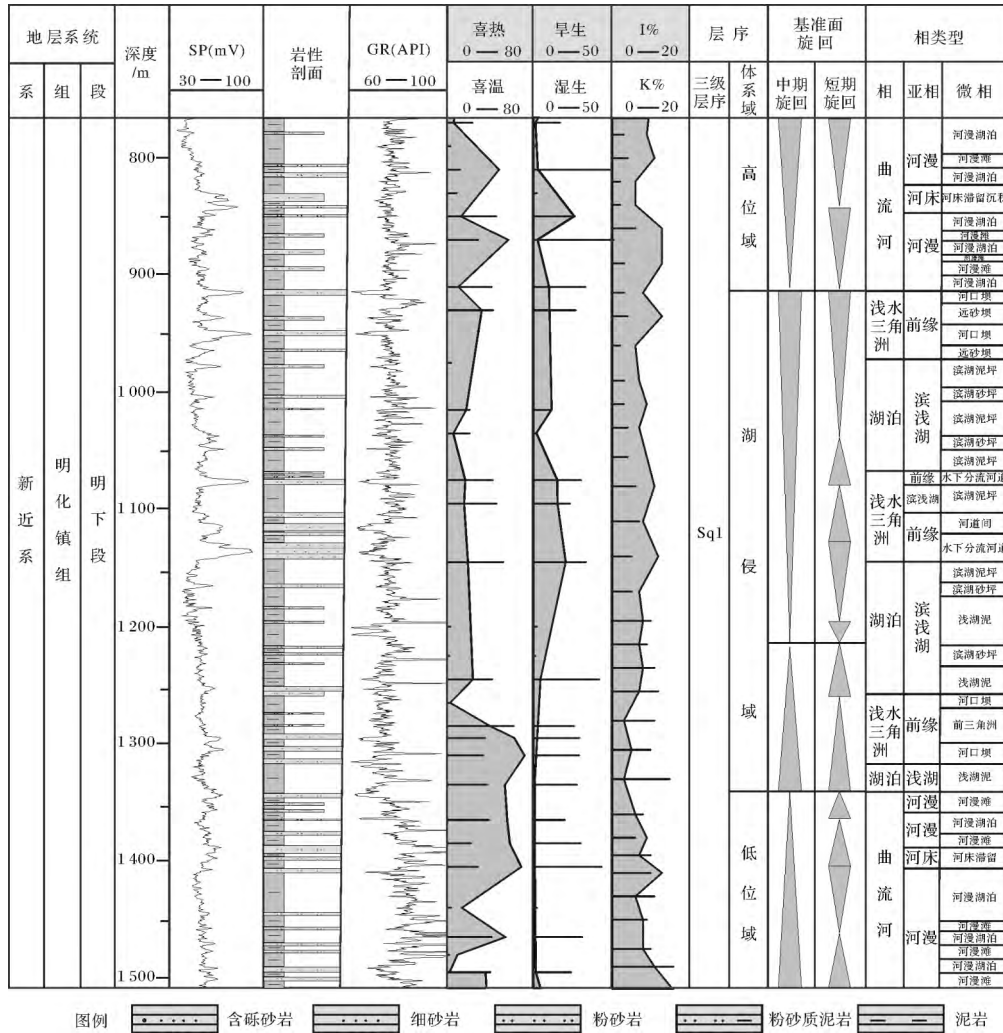


图 2 KL6-A 井明下段层序地层图

Fig.2 Sequence stratigraphy of Well KL6-A in the low segment of Minghuazhen Formation

基本单位。体系域的划分主要是初始湖泛面和最大湖泛面的识别。初始湖泛面是指湖平面缓慢上升,由于构造、气候、海侵等因素的影响,使湖平面开始快速上升时的位置。穿过该界面水体突然加深,岩石粒度变细,泥岩含量增多,泥岩颜色由浅变深,常由界面下的加积型或弱退积型准层序组突变为界面上的退积型准层序组。

最大湖泛面是湖平面快速上升,岸线不断向陆迁移至最大限度时湖平面所处的位置。该时期由于湖盆可容空间增加速率远大于沉积物供给速率,盆地中心处于沉积饥饿状态,形成厚层的“密集段”沉积。明下段中下部地震反射层形成 3~4 个相位连续性好、中频率的强振幅反射,全区分布稳定,易于追踪对比。穿过该界面砂泥岩比率变大,泥岩颜色由深变浅,界面下的退积型准层序组转变为界面上的加积型准层

序组至进积型准层序组。

### 2.2.2 体系域特征

根据钻测井资料及地震资料对初始湖泛面和最大湖泛面的识别,认为明下段层序可划分为低位体系域(LST)、湖侵体系域(TST)和高位体系域(HST)(图 3)。

低位体系域形成于层序发育早期,位于层序的底部,底界与层序底界一致,顶界为初始湖泛面。低位域时期为基准面缓慢上升,可容纳空间较小,物源供给相对充分,单层砂体较厚,垂向上以多个河道叠置为特征,测井曲线呈尖锐锯齿状、GR 基值明显抬高为特征,具有典型的退积序列。地震剖面上表现为低频、弱连续、短轴状、中强振幅反射特征,平面上呈枝状、脉状特征。

湖侵体系域底界面为初始湖泛面,顶界面为最

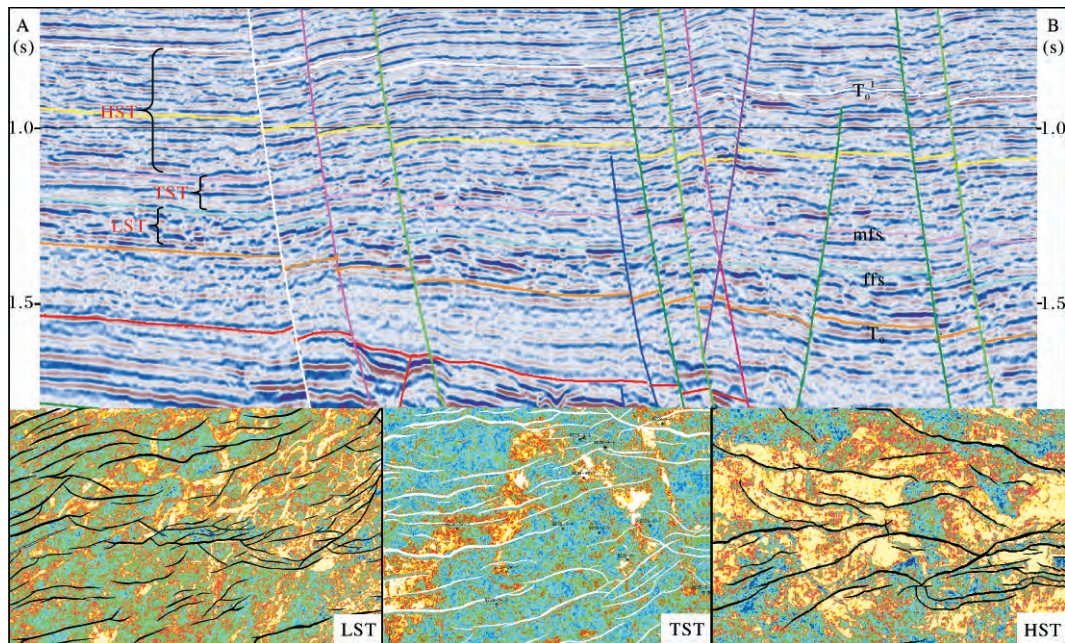


图 3 明化镇组下段地震相特征

Fig.3 Seismic character of the low segment of Minghuazhen Formation

大湖泛面。湖侵域时期为基准面上升到最大,可容纳空间增大,砂体以孤立的浅水三角洲前缘水下分流河道或决口扇为特征。测井曲线为平直低幅度指状,准层序表现为退积式序列,反映水体逐渐加深。地震剖面上以中频、断续弱振幅反射为主,间或有中频强振幅反射,平面上呈朵叶状、陀状分布。

高位体系域位于层序的最上部,底界面为最大湖泛面,顶界面为层序边界。高位域早期基准面缓慢下降,可容空间减小,主要发育进积型浅水三角洲,面积最大可超过 50 km<sup>2</sup>。高位域时期为基准面快速下降,可容空间变小,河道砂体表现为强烈席状化特征,棕红色泥岩、花斑泥岩广泛分布、测井曲线为低幅锯齿状,准层序表现为进积式序列特征。地震剖面上表现为中频、弱连续、中强振幅反射特征,平面上呈席状分布。

### 2.3 砂体结构

储层的砂体结构又称骨架模型(Fractal work model)指的是砂体的几何形态及其在三维空间上的展布,是砂体连通性及砂体与渗流屏障空间组合分布的特征<sup>[28]</sup>。以黄河口凹陷为例,利用三维可视化、地震属性、地层切片等技术,结合黄河口凹陷 112 口探井、评价井岩性资料,建立黄河口凹陷新近系明下段不同体系域内拼合板型、孤立型、席状型三种砂体结构,分别对应低位域(LST)分支河道型浅水三角洲、

湖侵域(TST)砂坝型浅水三角洲、高位域(HST)席状型浅水三角洲(图 4)。

明下段下部低位域分支河道型浅水三角洲砂体结构为拼合板型。发育水下分流河道和河道间沉积。河道在剖面上短轴、透镜状,平面上呈多条不规则状分布,砂体叠覆、河道互相切割、彼此连通性较好,砂地比为 0.30~0.40。单一水道 10~200 m 之间,但在交会处可达 500~600 m,砂体在三维空间上连通性差,圈闭类型为构造圈闭、岩性—构造圈闭。

明下段中部湖侵域砂坝型浅水三角洲砂体结构为孤立型。发育水下分流河道和河口坝两种微相,末端分流河道系统和前缘的主河道构成朵叶形态,多被侧向或上游迁移河口坝充填,形成面积较大砂坝、砂丘。砂坝是浅水三角洲的沉积骨架,是三角洲前缘相中储层性质最好的一类储层。砂地比为 0.15~0.2,砂体连通性较好,圈闭类型为构造圈闭、岩性圈闭,是黄河口凹陷浅层明下段最主要的勘探层系。

明下段上部高位域席状型浅水三角洲砂体结构为席状型。早期沉积的水下分流河道、河口坝沉积受波浪改造作用,席状化特征明显。砂体在平面上呈席状、片状分布,单层砂体薄,一般不超过 10 m,砂地比为 0.20~0.30。砂体连通性中等,圈闭类型为构造圈闭、构造—岩性圈闭。

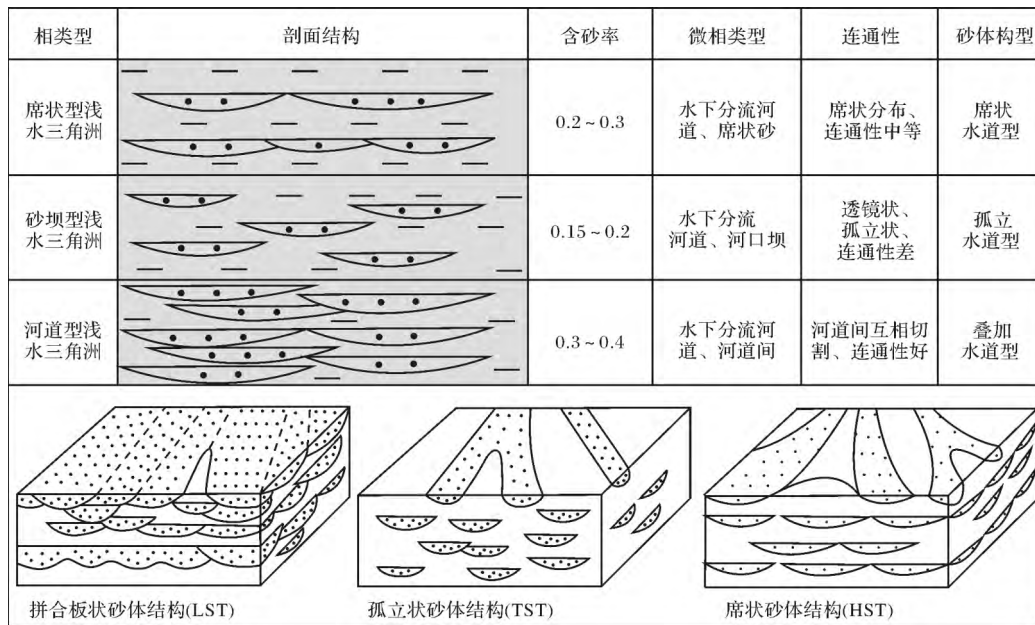


图 4 明下段浅水三角洲砂体结构

Fig.4 Sand body architecture of shallow water delta in low segment of Minghuazhen Formation

### 3 浅水三角洲前缘砂体沉积模式

Fisk<sup>[1]</sup>最早提出了浅水三角洲的概念。浅水三角洲沉积发育于较浅水湖泊中,沉积特征不同于一般三角洲,关于渤海海域新近系浅水三角洲报道文献较多,朱伟林等<sup>[29]</sup>论述了浅水三角洲形成的古地理背景、识别标志、浅水三角洲分布与大中型油气田关系;张昌民等<sup>[30]</sup>从现代沉积入手,对浅水三角洲的沉积特征和模式进行了讨论,建立了分流河道型、分流砂坝型两种浅水三角洲沉积模式。通过对黄河口凹陷浅水三角洲前缘砂体结构类型研究,结合浅水三角洲相标志、平面特征及纵向演化,建立了敞流沉积环境下浅水三角洲沉积模式。

#### 3.1 相标志特征

浅水三角洲由于形成的水体很浅、水底地形平坦、地貌斜坡不明显,一般以河流的进积作用为主,湖水波浪改造能力很弱,因而显现出特有的沉积特征,具体表现为:相对发育的水下分流河道、不甚发育的河口坝沉积、不连续的垂向沉积层序,广泛分布的席状砂、类似于三角洲砂体形态,三层式结构不明显,以浅湖相为主的前三角洲沉积,前三角洲中极少发育重力流性质的砂体<sup>[29]</sup>。近些年来,尤其是三维地震覆盖,地震属性清晰刻画了三角洲砂体的平面分布、砂体呈朵叶状、基本连片分布。测井相表现为高幅锯齿状、局部为漏斗状(图 5)。

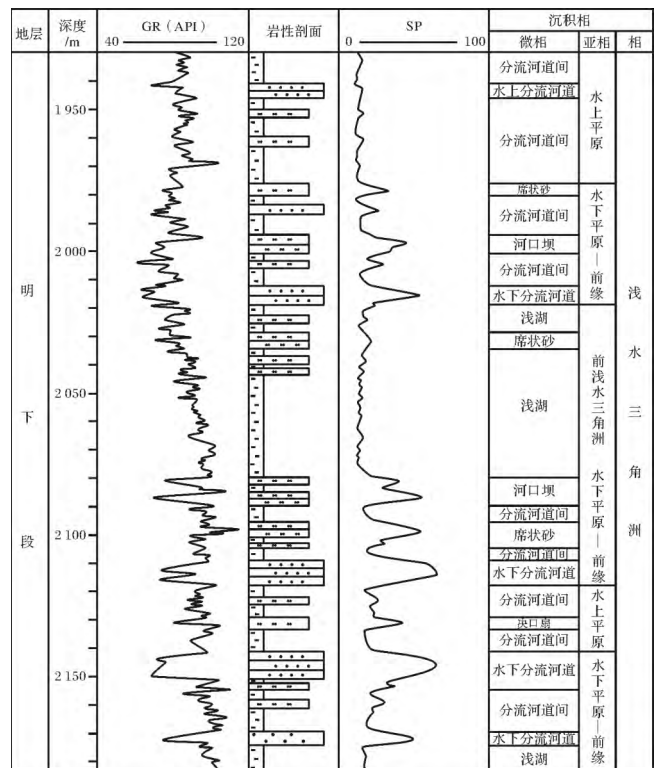


图 5 黄河口凹陷明化镇组浅水三角洲沉积层序

Fig.5 Sedimentary sequence of shallow water delta in lower Minghuazhen Formation in Huanghekou sag

#### 3.2 浅水三角洲沉积模式

浅水三角洲前缘被描述为贫砂特征。近些年研

究表明, 古代、现代三角洲前缘包含复杂的砂体形态、大量末端分流河道、水下堤岸、河口坝等沉积, 一些学者将其描述为浅水三角洲前缘结构<sup>[31-35]</sup>。黄河口凹陷浅水三角洲具有河控三角洲特征, 发育大量规模不等的分流河道, 在浅水湖盆中, 河控三角洲发育几百条小型末端分流河道, 末端分流河道特征表现为: ①水浅、河道窄与主流河道相比, 水上水下均有分布, 河口坝发育(图 6); ②发育大量不同方向的主河道; ③具有较低的地形沉积特征; ④缺少早期深切沉积特征; ⑤晚期分流河道沉积结构代表河流相和湖盆交汇沉积过程。

不同时期, 浅水三角洲前缘砂体分布不同。低位域时期, 湖平面相对下降, 主要发育浅水三角洲平原(水上)、浅水三角洲前缘(水下), 砂体互相切割、叠置, 形成拼合板状砂体结构, 沉积微相为水下分流河道、天然堤沉积; 湖侵域时期, 随着湖平面缓慢上升, 河道退积作用明显, 受波浪改造作用影响较大, 砂体朵叶状分布, 形成面积较大砂坝、砂丘。高位域时期, 前缘末端河道、砂坝席状化作用明显, 前缘砂体体系中河口坝不发育, 砂体在平面上呈席状、片状分布, 主要受晚期波浪与河道共同作用的控制(图 7)。

#### 4 浅水三角洲形成的控制因素

不同类型浅水三角洲砂体分布、叠加方式及砂

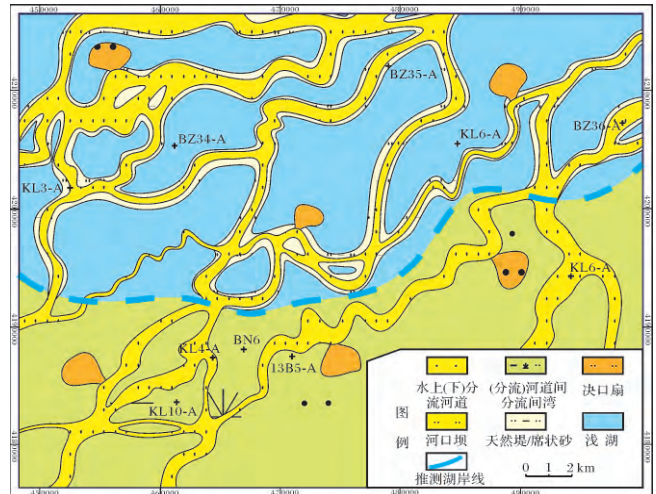


图 6 明下段低位域时期沉积相图

Fig.6 Sedimentary facies of in LST of low segment of Minghuazhen Formation

体结构受湖平面变化、古气候、古水深、古地形坡度影响。尤其是古气候影响的湖平面相对变化控制了浅水三角洲前缘砂体的微相类型、结构及分布。结合现代沉积及水槽模拟实验, 建立了黄河口凹陷不同体系域内温凉型、湿热型两种层序成因模式(图 8)。

明下段早期低位域时期(LST)为干燥温暖性气候、古水深为6~10m, 古地形坡度小于1°, 湖平面

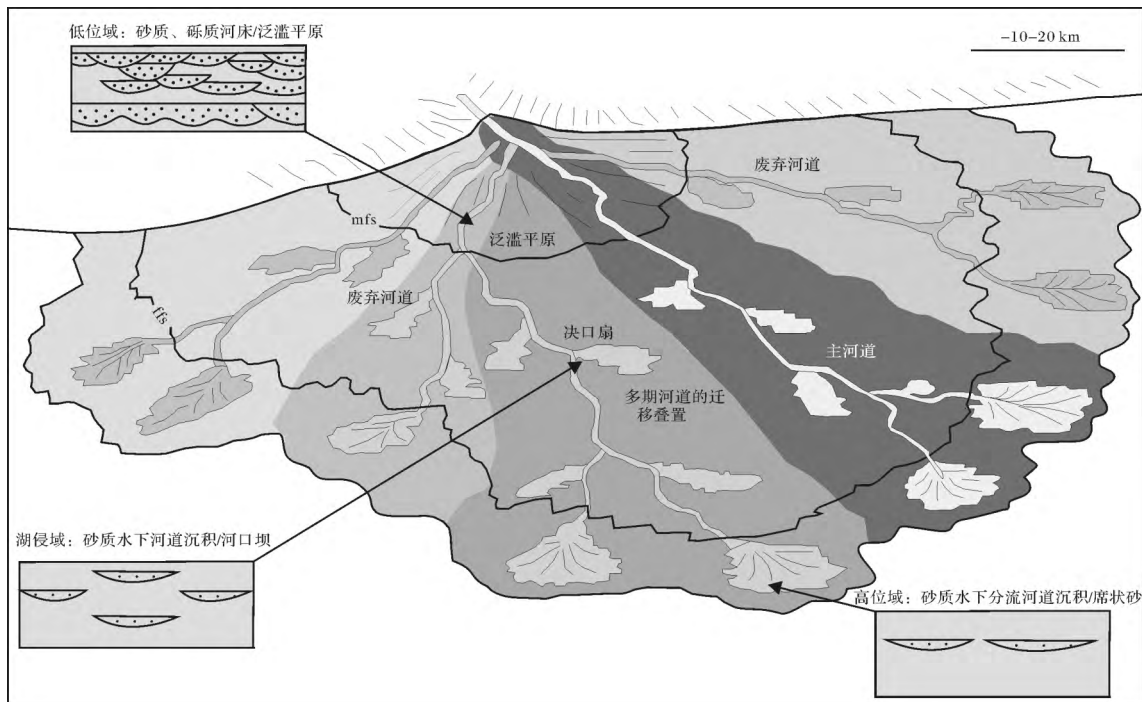


图 7 黄河口凹陷明下段敞流型浅水三角洲沉积模式

Fig.7 Sedimentary model of river and shallow water delta in low segment of Minghuazhen Formation

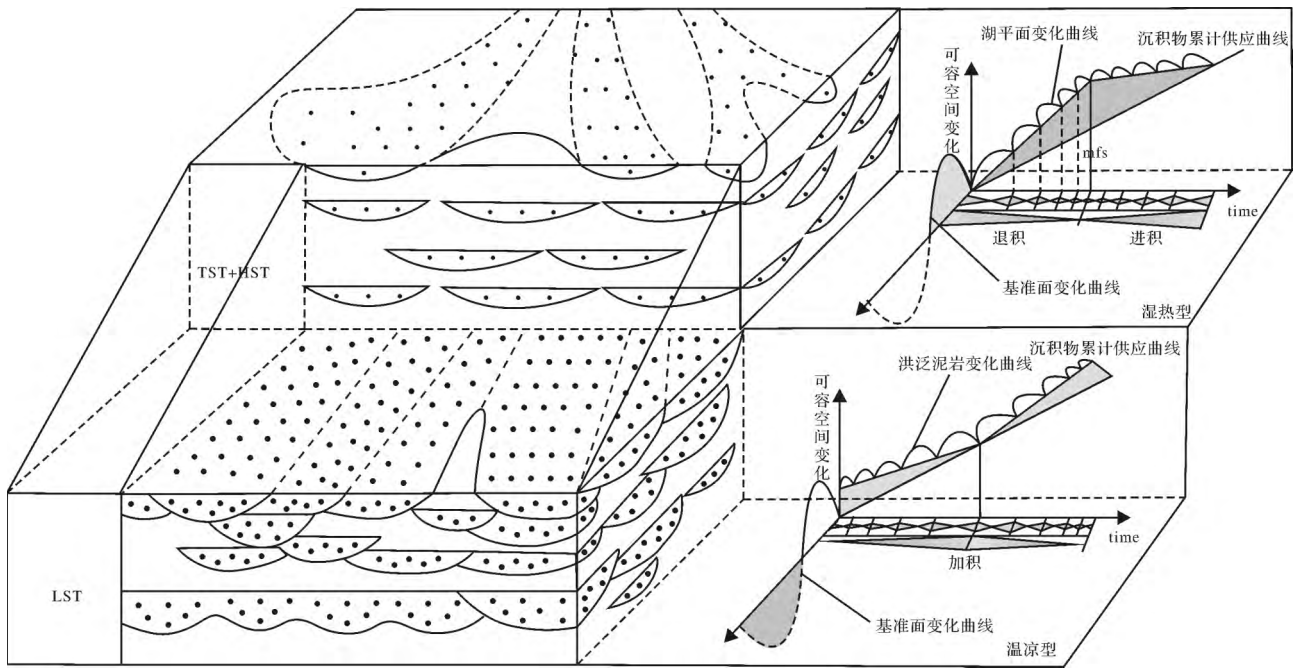


图 8 黄河口凹陷明下段层序地层模式

Fig.8 Sequence stratigraphy model of low segment of Minghuazhen Formation in Huanghekou sag

频繁波动、河道砂体呈枝状、脉状分布,具有正旋回韵律沉积特征,骨架砂体为水下分流河道、天然堤,天然堤宽度为河道宽度的 3~4 倍,发育顺直型水下分流河道,河道交叉、叠置。利用 Google Earth 平台提供的卫星照片可以研究浅水三角洲形成、分布特征。以现代鄱阳湖沉积为例,枯水期时期三角洲前缘砂体与明下段早期低位域砂体分布相似,砂体呈条带状展布,分流河道以顺直型为主,并向湖内不断延伸且有些河道延伸较远。部分分支河道废弃形成牛轭湖,分流间洼地积水较少。此种三角洲的发育受波浪作用影响较弱,基本不能对入湖沉积进行改造(图 9A)。水槽实验模拟也证实湖平面相对下降时期,河道中可容空间减少,河道以进积特征为主。河道直接越过前期的河口沉积,形成坝上河流的冲越方式,通常被描述为厚度大、分布窄、分支河道相对贫砂的特征;随着湖平面缓慢下降,总会使得河道不断向前推进,在后期的河道发育的基础上进一步河道化,总体上形成以分流河道为主的沉积方式(图 10A)。

明下段中晚期湖侵域、高位域时期(TST+HST)为湿热温暖性气候、古水深为 8~12 m,随着湖平面上升、河道砂体受湖平面改造呈朵状、坨状分布,具有反旋回韵律沉积特征,骨架砂体为砂坝,后期演化而成砂洲、沼泽,发育砂坝型浅水三角洲

(TST);随着古水深缓慢下降、三角洲朵体受波浪、沿岸流改造作用、致使河口坝、河道砂体呈席状、片状分布,骨架砂体为席状砂、滨湖砂坝,发育席状型浅水三角洲(HST),鄱阳湖洪水期时期三角洲前缘砂体与明下段中、晚期砂体分布相似。浅水三角洲前缘为主要沉积物卸载区,发育多级末端分流河道系统,与俄罗斯现代伏尔加河和 Laptev 河三角洲前缘砂体体系类似<sup>[9]</sup>。鄱阳湖洪水期发育 4 条水下分流河道,其中最西侧的主分流河道能量强,入湖前发生多个末端分流河道系统,河道宽度在几十米到几百米,前缘主河道与末端分流河道系统构成朵叶形态,末端分流河道与河口坝沉积密切相关,多被侧向或上游迁移河口坝充填。砂坝是此类三角洲的沉积骨架,并在后期不断接受沉积后出露水面,逐渐演化成砂洲、沼泽(图 9B)。水槽模拟研究表明,湖平面相对上升期,由于湖水涌上作用,导致沉积基准面的抬升,从而使得河道内的沉积量加大,沉积物大量堆积导致河流排水不畅,河流中的水面进一步抬升,河流中的沉积进一步增加,而其前部的湖水中的沉积相对较少。同时增加的河—湖之间的这种压力差异,使得河流中的水通过主流线外的部位排入湖中,产生决口,进而形成前缘河道与末端分流河道系统构成朵叶形态的沉积(图 10B)。



图 9 鄱阳湖枯水期 (A)、洪水期 (B) 沉积环境变化遥感图

Fig.9 Remote sensing image sedimentary environment change from dry season (A) to flood period (B) in Poyang Lake

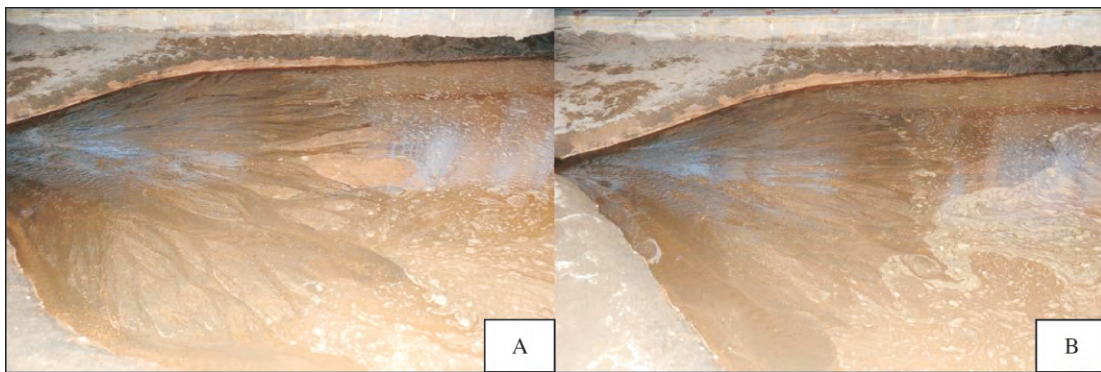


图 10 实验模拟三角洲沉积特征 (A. 湖平面下降期; B. 湖平面上升期)

Fig.10 Sedimentary characteristics of experimental simulation (A. Lake level fall; B. The rise of lake level)

## 5 结论

(1) 黄河口凹陷新近纪渤海湾盆地具有构造稳定、沉降缓慢、地形平缓、坡度小等特点; 古气候资料证实渤海海域新近纪中期(明下段沉积时期)湿润亚热带到暖温带气候, 广泛发育浅水三角洲及浅水湖泊沉积。

(2) 黄河口凹陷新近系明下段划分为 1 个三级层序, 3 个体系域。不同体系域内浅水三角洲沉积前缘体系的砂体结构具有差异性。低位域时期发育分流河道型浅水三角洲、砂体结构为拼合板状; 湖侵域时期发育砂坝型浅水三角洲、砂体结构为孤立状; 高位域时期发育席状型浅水三角洲、砂体结构为席状特征。

(3) 古气候影响的湖平面相对变化控制了浅水三角洲前缘砂体的微相类型、结构及分布, 最终建立黄河口凹陷温凉型、湿热型两种浅水三角洲沉积层序成因模式。早期分流河道型浅水三角洲水

浅、河道窄, 脉状、枝状分布; 发育大量不同方向的主河道, 河口坝相对不发育; 晚期随着湖平面上升, 末端分流河道沉积特征表现为河道和湖盆交汇沉积过程, 河道砂体受湖平面改造呈朵状、坨状分布, 发育砂坝型浅水三角洲; 后期在波浪改造作用下, 进一步演化而成砂洲、沼泽, 形成席状型浅水三角洲。

## 参考文献 (References)

- 1 Fisk H N. Bar-finger sands of the Mississippi delta, in *Geometry of Sandstone Bodies* [C]. AAPG, 45th Annual Meeting, 1961: 29-52
- 2 Postma G. An analysis of the variation in delta architecture [J]. *Terra Nova*, 1990, 2 (2): 124-130
- 3 Ganil M R, Bhattacharya J P. Basic building blocks and process variability of a Cretaceous delta: internal facies architecture reveals a more dynamic interaction of river, wave, and tidal processes than is indicated by external shape [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(4): 284-302
- 4 Hoy R G, Ridgway K D. Sedimentology and sequence stratigraphy of fan-delta and river-delta deposystems, Pennsylvanian Minturn Forma-



- tion, Colorado[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(7): 1169-1191
- 5 Keumsuk L I, McMechan G A, Gani M Ro, et al. 3-D architecture and sequence stratigraphic evolution of a forced regressive top-truncated mixed-influenced delta, Cretaceous Wall Creek sandstone, Wyoming, U.S.A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(4): 284-302
  - 6 Lemons D R, Chan M A. Facies architecture and sequence stratigraphy of fine-grained lacustrine deltas along the eastern margin of late Pleistocene Lake Bonneville, northern Utah and southern Idaho[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(4): 635-665
  - 7 Plint A G. Sequence stratigraphy and paleogeography of a Cenomanian deltaic complex: the Dunvegan and lower Kaskapau formations in subsurface and outcrop, Alberta and British Columbia, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2000, 48(1): 43-79
  - 8 Bryan D, Ritchie, Rob L, et al. Three-dimensional numerical modeling of deltaic depositional sequences: influence of local controls[J]. Journal of Sedimentary Research, 2004, 74(2): 221-238
  - 9 Nichols G J, Fisher J A. Processes, facies and architecture of fluvial distributary system deposits[J]. Sedimentary Geology, 2007, 195(1/2): 75-90
  - 10 Busch D A. Prospecting for stratigraphic traps[J]. AAPG Bulletin, 1959, 43(12): 2829-2843
  - 11 Busch D A. Genetic units in delta prospecting[J]. AAPG Bulletin, 1971, 55(8): 1137-1154
  - 12 Cleaves A W, Broussard M C. Chester and Pottsville depositional systems, outcrop and subsurface, in the Black Warrior Basin of Mississippi and Alabama[J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 1980, 30: 49-59
  - 13 赵翰卿. 松辽盆地大型叶状三角洲沉积模式[J]. 大庆石油地质与开发, 1987, 6(4): 1-9 [Zhao Hanqing. Sedimentary model of large scale leaf-shaped delta in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1987, 6(4): 1-9]
  - 14 楼章华, 卢庆梅, 蔡希源, 等. 湖平面升降对浅水三角洲前缘砂体形态的影响[J]. 沉积学报, 1998, 16(4): 27-31 [Lou Zhanghua, Lu Qingmei, Cai Xiyuan, et al. Influence of lake level fluctuation on sandbody shapes at shallow water delta front[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(4): 27-31]
  - 15 吕晓光, 李长山, 蔡希源, 等. 松辽大型浅水湖盆三角洲沉积特征及前缘相储层结构模型[J]. 沉积学报, 1999, 17(4): 572-577 [Lü Xiaoguang, Li Changshan, Cai Xiyuan, et al. Depositional characteristics and front facies reservoir framework model in Songliao shallow lacustrine delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(4): 572-577]
  - 16 姚光庆, 马正, 赵彦青, 等. 浅水三角洲分流河道砂体储层特征[J]. 石油学报, 1995, 16(1): 24-31 [Yao Guangqing, Ma Zheng, Zhao Yanqin, et al. Reservoir characteristics of distributary channel sand bodies of shallow water delta[J]. Acta Petrolei Sinica, 1995, 16(1): 24-31]
  - 17 彭文绪, 孙和风, 张如才, 等. 渤海海域黄河口凹陷近源晚期优势成藏模式[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 510-518 [Peng Wenxu, Sun Hefeng, Zhang Rucui, et al. Late-stage near source preponderant hydrocarbon pooling pattern in the Huanghekou sag of the Bohai sea waters[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 510-518]
  - 18 陈斌, 邓运华, 郝芳, 等. 黄河口凹陷 BZ34 断裂带油气晚期快速成藏模式[J]. 石油学报, 2006, 27(1): 37-41 [Chen Bin, Deng Yunhua, Hao Fang, et al. Late-stage rapid petroleum accumulation model of BZ34 fault zone in Huanghekou sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(1): 37-41]
  - 19 朱秀香, 吕修祥, 王德英, 等. 渤海海域黄河口凹陷走滑转换带对油气聚集的控制[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 476-482 [Zhu Xiuxiang, Lü Xiuxiang, Wang Deying, et al. Controlling effect of a strike slip transform belt Hydrocarbon accumulations in Huanghekou sag, the Bohai Sea waters[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(4): 476-482]
  - 20 孙和风, 周心怀, 彭文绪, 等. 渤海南部黄河口凹陷晚期成藏特征及富集模式[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(3): 307-313 [Sun Hefeng, Zhou Xinhui, Peng Wenxu, et al. Late-stage hydrocarbon accumulation and enrichment in the Huanghekou sag, southern Bohai Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(3): 307-313]
  - 21 中国石油地质志编委会. 中国石油地质志第十六卷: 上册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990: 67-74 [Editing Committee of Petroleum Geology of China. Petroleum Geology of China(Vol.16) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990: 67-74]
  - 22 John H, Robert W S, Francisca E O. Base-level buffers and buttresses: A model for upstream versus downstream control on fluvial geometry and architecture within sequences[J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(1): 162-174
  - 23 李玉成, 王苏民, 黄耀生. 气候环境变化的湖泊沉积学响应[J]. 地球科学进展, 1999, 14(4): 412-416 [Li Yucheng, Wang Sumin, Huang Yaosheng. The lake sediments responses to environmental and climatic change[J]. Advance in Earth Sciences, 1999, 14(4): 412-416]
  - 24 赖维成, 周心怀, 李建平, 等. 湖盆萎缩期准平原沉积层序划分与砂体特征研究——以黄河口地区新近系明下段为例[J]. 中国海上油气, 2009, 21(3): 157-161 [Lai Weicheng, Zhou Xinhui, Li Jianpin, et al. Stratigraphic sequence division and sandbody characteristics of peneplain deposits during lacustrine basin shrinking: A case study of Lower Member of Neogene Minghuazhen Formation in the area of Yellow River mouth[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(3): 157-161]
  - 25 关学婷, 范慧萍, 宋之琛, 等. 渤海海域晚新生代孢粉学研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 1989 [Guan Xueting, Fan Huiping, Song Zhichen, et al. Palynology of Late Cenozoic in Bohai Sea Waters[M]. Njing: Njing University Press, 1989]
  - 26 Vail P R, Mitchum R M, Thompson S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level: Part 5. Chronostratigraphic significance of seismic reflections: Section 2. Application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation [J]. AAPG Memoir, 1977, 26: 99-116
  - 27 Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M, et al. Siliciclastic

- sequence stratigraphy in well logs , cores and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies [J]. AAPG , Methods in Exploration Series , 1990 , 7: 55-56
- 28 Webber K J , Van Geuns L C. Framework for constructing clastic reservoir simulation models [J]. Journal of Petroleum Technology , 1990 , 42( 10) : 1248-1297
- 29 朱伟林 , 李建平 , 周心怀 , 等. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探 [J]. 沉积学报 , 2008 , 26( 4) : 575-582 [Zhu Weilin , Li Jianping , Zhou Xinhui , *et al.* Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay , China [J]. Acta Sedimentologica Sinica , 2008 , 26( 4) : 575-582]
- 30 张昌民 , 尹太举 , 朱永进 , 等. 浅水三角洲沉积模式 [J]. 沉积学报 , 2010 , 28( 5) : 933-944 [Zhang Changmin , Yin Taiju , Zhu Yongjin , *et al.* Shallow water deltas and models [J]. Acta Sedimentologica Sinica , 2010 , 28( 5) : 933-944]
- 31 Van I L , Roberts H H. Facies development of Atchafalaya Delta , Louisiana: a modern bayhead delta [J]. AAPG Bulletin , 1988 , 72( 4) : 439-453
- 32 Tye R S , Coleman J M. Evolution of Atchafalaya lacustrine deltas , southcentral Louisiana [J]. Sedimentary Geology , 1989( 65) : 95-112
- 33 Rodriguze A B , Hamilton M D , Anderson J B. Facies and evolution of the modern Brazos Delta , Texas; wave versus flood influence [J]. Journal of Sedimentary Research , 2000 , 70: 283-295
- 34 Bhattacharya J P , Wills B J. Lowstand deltas in the Frontier Formation , Powder River Basin , Wyoming: implications for sequence stratigraphic models [J]. AAPG Bulletin , 2001 , 85( 2) : 261-294
- 35 Overeem I , Kroonenteberg S B , Veldkamp A , *et al.* Small-scale stratigraphy in a large ramp delta: recent and Holocene sedimentation in the Volga delta , Caspian Sea [J]. Sedimentary Geology , 2003 , 159( 3/4) : 133-157

## Unconfined Flow Deposits in Front Sandbodies of Shallow Water Deltaic Distributary Systems

ZHANG Xin-tao   ZHOU Xin-huai   LI Jian-ping   NIU Cheng-min

( Development Research Institute of Bohai Oil Field of . Tianjin Branch , CNOOC Ltd. , Tianjin 300452)

**Abstract:** Bohai Basin is characterized by stable tectonics with steady and slow subsidence , which formed in low-relief and low gradient during the Neogene. The paleoclimate data confirmed that the Bohai area was humid subtropical to warm temperate climate and widely developed shallow-water delta and shallow lake sedimentation system in Middle Neogene ( sedimentary period of the Lower Member of Minghuazhen Formation) . Changes of palaeogeomorphology , palaeoclimate and ancient water depth controlled shallow water deltaic distributary systems' front sandbodies' architectures , distribution and evolution. Application of the principle of sequence stratigraphy , the lower member of Minghuazhen Formation in Huanghekou sag will be divided into one three order sequence and three system tracts which is LST , TST and HST. On the basic , recognized three kinds of sand body architectures include the stacked channel type , isolated channel type , sheeted channel type. According to core , logging , seismic , means of modern sediments and tank simulation experiment , we established depositional model of Huanghekou sag fluvial-dominated delta in the lower member of Minghuazhen Formation.

**Key words:** unconfined flow deposits; fluid-dominated shallow water deltaic; modern sediments; flume experiment; sedimentary model