

文章编号: 0253-2697(2016)11-1394-09 DOI:10.7623/syxb201611007

末端分流河道-河口坝三维地震表征及演化

——以松辽盆地古龙凹陷英 79 井区为例

李 磊^{1,2} 许 璐^{1,2} 刘 豪³ 谭 卓⁴ 唐 文^{1,2}

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院 陕西西安 710065; 2. 陕西省油气成藏地质学重点实验室 陕西西安 710065;
3. 中国地质大学海洋学院 北京 100083; 4. 中海油研究总院 北京 100028)

摘要:以松辽盆地古龙凹陷为例,基于钻、测井数据以及三维地震数据,开展末端分流河道-河口坝三维地震表征,对河口坝的动力学形成机制进行分析,并结合现代赣江三角洲河口坝沉积观测结果,总结分流河道-河口坝的沉积演化模式。古龙凹陷英 79 井区嫩江组三段可识别出 3 期分流河道-河口坝。从早期到晚期,泥岩颜色由黑灰色、深灰色到灰绿色转变以及河口坝厚度逐渐减薄(10 m、8.5 m 和 4.25 m),显示湖水由深变浅(17 m、14 m 和 7 m)。反旋回、漏斗状的河口坝在地震剖面上呈透镜状、高频、中弱振幅反射特征。携带细粒沉积物的水流在末端分流河道出口处,以紊流射流方式注入湖水,形成第 1 级河口坝。当第 1 级河口坝坝顶水体较浅时,第 1 级河口坝停止生长。水流在第 1 级河口坝两侧分流并水道化,形成次一级分流河道-河口坝。由于水深、分流河道的河口宽度不同,在分流河道末端发育不同级次、不同规模、展布特征差异的河口坝群。河口坝宽度与河口坝长度呈线性正相关,而河口坝长度则与其对应的分流河道口的宽度呈指数相关。

关键词:末端分流河道;河口坝;紊流射流;动力学机制;古龙凹陷;松辽盆地

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

3D seismic characterization and evolution of terminal distributary channel-mouth bar: a case study of Well Ying79 in Gulong sag, Songliao Basin

Li Lei^{1,2} Xu Lu^{1,2} Liu Hao³ Tan Zhuo⁴ Tang Wen^{1,2}

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Shaanxi Xi'an 710065, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Shaanxi Xi'an 710065, China;
3. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
4. CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: Taking Gulong sag in the Songliao Basin as an example, the seismic characterization of terminal distributary channel-mouth bar was performed based on drilling, well logging and 3D seismic data. In combination with observations of mouth bar deposits in the modern Ganjiang Delta, this paper analyzes the dynamic formation mechanism of mouth bar and summarizes the depositional evolution model of distributary channel-mouth bar. Three stages of distributary channel-mouth bar can be identified in the 3rd Member of Nenjiang Formation in Well Ying79, Gulong sag. From the early stage to the late stage, mudstone color changes from black gray, dark gray to gray green and mouth bar gradually thins (10 m, 8.5 m and 4.25 m), indicating the lake water from deep to shallow (17 m, 14 m and 7 m). The documented mouth bars show coarsening upward trend and funnel-shaped well-log patterns, and display high frequency, middle-low amplitude, lenticular reflection configuration. Fine-grained sediment-laden flows debouch into the lake in a form of turbulent jet at the outlet of terminal distributary channel, thus forming the Level 1 mouth bar. When the water depth above the interpreted mouth bars is shallow enough, the Level 1 mouth bar stagnates. Water flows bifurcate at the two sides of Level 1 mouth bar and are channelized, thus forming the lower-level distributary channel-mouth bar. Due to the different water depth and width of distributary channel, mouth bar groups with various levels, scales and distribution characteristics are developed at the end of the distributary channel. The width of mouth bar is positively correlated with its length, and the length is exponentially related to the width of corresponding distributary channel.

Key words: terminal distributary channel; mouth bar; turbulent jet; dynamics; Gulong sag; Songliao Basin

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41302147, No. 41372118)、陕西省教育厅项目(No. 14JK1586)和西安石油大学青年科技创新基金项目(2014BS25)资助。

第一作者及通信作者:李 磊,男,1979 年 3 月生,2001 年获西南石油学院应用地球物理专业学士学位,2010 年获中国石油大学(北京)地质资源与地质工程专业博士学位,现为西安石油大学副教授,主要从事地震资料综合解释及地震沉积学方面的教学与科研工作。Email: lilei@xsyu.edu.cn

引用:李磊,许璐,刘豪,谭卓,唐文.末端分流河道-河口坝三维地震表征及演化——以松辽盆地古龙凹陷英 79 井区为例[J].石油学报,2016,37(11):1394-1402.

Cite:Li Lei,Xu Lu,Liu Hao,Tan Zhuo,Tang Wen.3D seismic characterization and evolution of terminal distributary channel-mouth bar;a case study of Well Ying79 in Gulong sag,Songliao Basin[J].Acta Petrolei Sinica,2016,37(11):1394-1402.

河口坝是三角洲前缘重要微相单元^[1-7]。深埋地下的河口坝是国内含油气盆地重要油气储层,是国内学者研究的主要目标之一^[8-14]。尽管存在大量的三角洲沉积露头,目前主要基于 Miall^[15]的构型界面定义,利用岩心、测井资料和动态资料,对河口坝构型进行定性和定量表征^[3,10-14,16-19]。但对河口坝形成的动力学机理、演化过程研究较少^[8,20-22]。河口坝微相在大多数含油气盆地,由于其沉积厚度和规模较小,无明显地震响应特征,难以直接识别,研究程度滞后。近年来,随着地震技术的发展,高分辨率三维地震资料已成为研究古沉积体系构型及其演化的有力工具^[23-27]。河口坝三维地震表征、形成动力学机理分析及演化研究能够为河口坝的形状、规模和空间分布预测提供理论依据^[2,6,15,28]。笔者利用钻、测井资料和三维地震资料,在河口坝三维空间宏观识别的基础上,然后基于河口坝形成的紊流射流(turbulent jet)动力学成因机制,并结合现代鄱阳湖赣江三角洲末端分流河道-河口坝的演化,对松辽盆地古龙凹陷英 79 井区嫩江组三段发育的分流河道-河口坝成因和演化进行分析,并总结了该地区分流河道-河口坝演化模式,以期对该地区及其他含油气盆地河口坝储层的储层预测提供理论依据。

1 古龙凹陷区域地质背景及研究区数据

松辽盆地古龙凹陷,西邻大安阶地,东邻大庆长垣[图 1(a)]。嫩江组沉积时期,松辽盆地处于裂后热沉降阶段^[29]。嫩江组一段沉积末期至嫩江组二段沉积初期,湖泊扩张达到最大规模^[29]。从嫩江组三段至五段沉积时期,发生湖退,发育一系列由东向西的三角洲沉积^[29-31]。

研究区只有一口钻井——英 79 井,嫩江组三段为主要目的层。嫩江组三段沉积时期,湖平面逐渐下降,发育进积三角洲。沿物源方向区域地震剖面可见同相轴下超现象[图 1(b)]。三维地震工区约 70 km²,频带范围 12~88 Hz,主频 50 Hz,地震数据采样率 2 ms。嫩江组三段的地震波速度为 3 450~4 000 m/s,地震垂向分辨率为 8~20 m。笔者基于英 79 井嫩江组三段的钻、测井资料和三维地震资料,在对现代鄱阳湖赣江三角洲末端分流河道-河口坝卫星图像观测分析的基础上,利用紊流射流理论对河口坝的形成、演化进行分析,并总结末端分流河道-河口坝沉积演化模式。

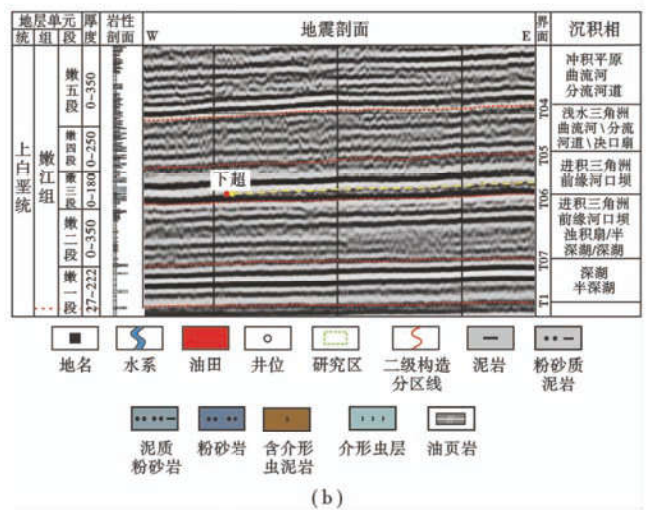
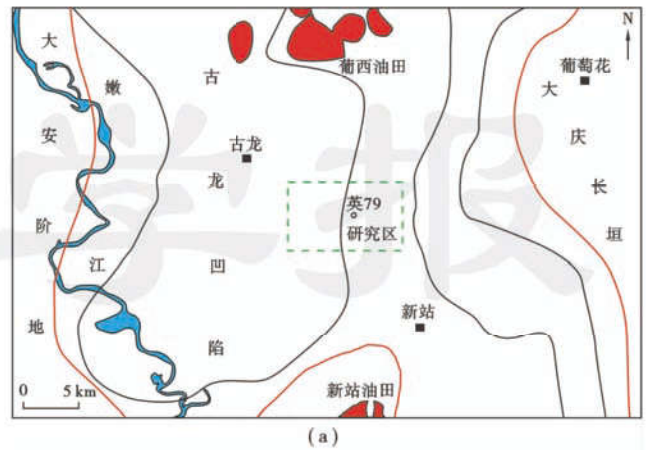


图 1 松辽盆地古龙凹陷英 79 井区位置及地层柱状 (据文献[29-31]修改)

Fig. 1 Location and stratigraphic column of Well Ying79 in Gulong sag,Songliao Basin

2 分流河道和河口坝的地质地球物理响应

2.1 分流河道和河口坝沉积的测井响应特征

英 79 井嫩江组三段由 3 套反旋回沉积组成(图 2):旋回 1 为一套 10 m 厚的进积河口坝沉积,具有反旋回特征,底部为深灰、黑灰色泥岩、灰色泥质粉砂岩(7.75 m 的中端河口坝沉积),上部粉砂岩(2.25 m 的近端河口坝沉积),自然伽马曲线和电阻率曲线呈漏斗状,解释为单一河口坝沉积;旋回 2 为分流河道-河口坝,底部为灰绿色泥岩和灰色粉砂质泥岩和泥质粉砂岩互层(4.75 m 的远端河口坝沉积),上部为灰色泥质粉砂岩(3.75 m 中端河口坝沉积),两者构成 8.5 m 厚的单一

进积河口坝沉积旋回。旋回2顶部由泥质粉砂岩和粉砂岩组成的4.5 m厚分流河道沉积;旋回3由滨浅湖灰绿色泥岩沉积和4.25 m厚的河口坝边缘粉砂质泥岩和灰色泥质粉砂岩沉积组成,呈反旋回特征。嫩江组二段沉积时期,由早期到晚期,湖水逐渐变浅,发育的河口坝厚度有减薄趋势。

2.2 分流河道-河口坝三维地震表征

对英79井嫩江组三段井震结合,精细标定结果显示,地震剖面上黑色低频、强波峰内夹有透镜状、高频、弱振幅异常体反射(图3),这些异常体反射对应钻、测井资料所揭示的河口坝沉积。为了刻画异常体平面展布特征,对地震异常体顶底界面进行精细层位解释,并提取顶底界面层间均方根振幅属性(图3);弱振幅异常体呈NE—SW向展布,在研究区右上角部分呈条带状分布,而在其末端呈朵状分布。基于英79井钻、测

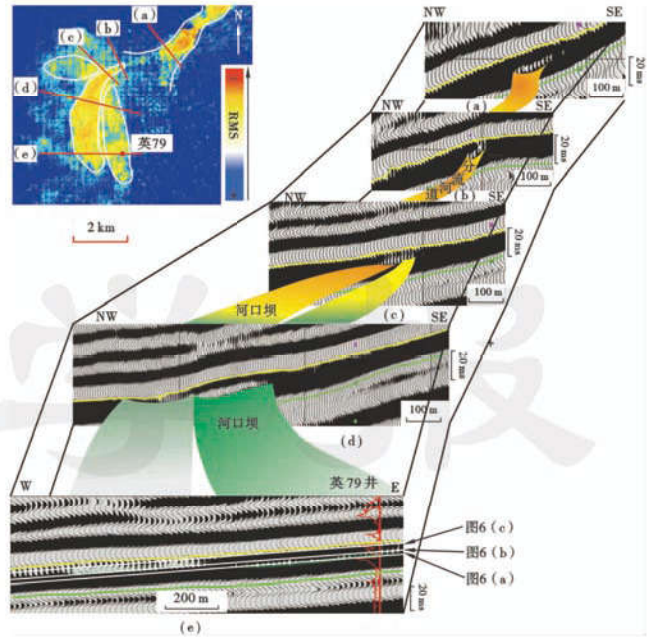


图3 分流河道-河口坝典型剖面

Fig. 3 Typical seismic sections of distributary channel-mouth bar

井解释结果和沉积相模式,研究区嫩江组三段发育的异常体解释为分流河道-河口坝。

均方根振幅及5条横切该异常体的地震剖面显示:研究区发育NE向的分流河道-河口坝;宽80~160 m的分流河道在地震剖面上表现为短透镜状、高频、中弱振幅反射[图3(a)、图3(b)];叠置河口坝在地震剖面上表现为垂向叠加、横向连接的长透镜状、高频、中振幅反射[图3(c)~图3(e)]。

3 河口坝动力学机制及河口坝分级

载有沉积物的水流在分流河道的出口处,由限定性流转化为非限定性流,并以紊流射流的方式流入湖水[图4(a)]^[2,6,28,32]。由于水流迅速扩散并受周围摩擦力的影响,水流减速^[32]。由分流河道口向湖中心方向,沿射流轴线,紊流射流搬运沉积物的能力逐渐减弱,在分流河道口前方形成朵状河口坝(图4)。

紊流射流在形成稳定的流态后,可以划分为初始段和主段两部分,其中初始段包括核心区 and 混合区[图4(a)]。射流可以看作是由射流主段边界线延伸的交点喷出。两射流内边界线包围的核心区(核心区长度约等于6倍分流河道宽度)内,水流速度不变,与分流河道口的水流速度一致。虽然射流卷吸周围水体,宽度不断扩展,质量不断增加,射流总体并未受外力作用。射流内部压力与周围湖水的压力差很小,可认为射流沿水平方向动量守恒。核心区内,横向速度为零,流线为水平直线。

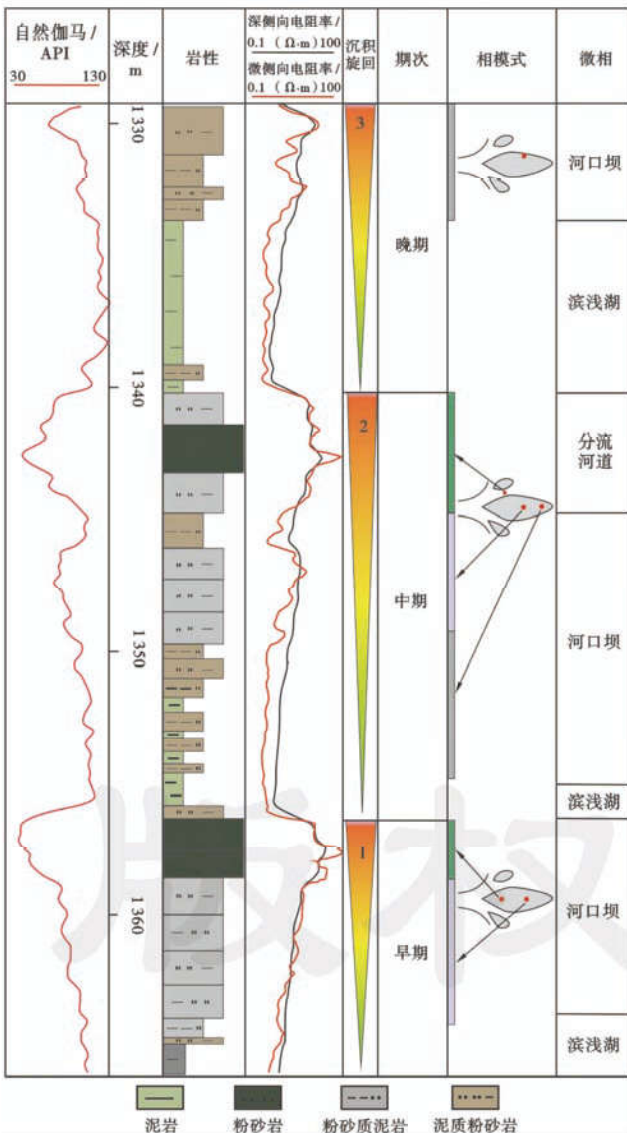


图2 英79井嫩江组三段分流河道-河口坝

Fig. 2 Distributary channel-mouth bar in the 3rd Member of Nenjiang Formation in Well Ying79

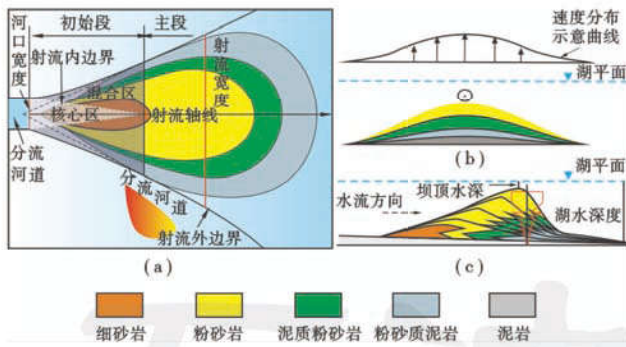


图 4 分流河道口紊流射流力学模型及河口坝模式;(b)沿射流轴线河口坝剖面模式;(c)河口坝中部横剖面模式

图 4 分流河道口紊流射流力学模型及河口坝模式
(据文献[2,6,28,33]修改)

Fig. 4 Mechanical model of turbulent jet of distributary channel and mouth bar model

射流内边界与外边界之间的混合区,由于射流与周围湖水发生动量交换,将周围的水体卷吸到混合区内,使混合区不断扩大。在初始阶段后,射流宽度仍不断扩大,形成射流主段。进入主段后,射流轴线上的速度不断减小。不同横截面上速度由射流轴线向两侧有减小趋势,并且速度分布可以以无量纲形式[采用无量纲速度(射流横截面上任意点处的速度与射流轴线上速度的比值)和无量纲距离(射流截面任意点处的高度与射流半宽度的比值)来表示射流主段内的速度分布]表示且具有相似性,即自模性[图 4(b)]^[2,6,28,33]。

Edmonds 和 Slingerland^[28] 研究发现,沿射流运动方向,垂直射流轴线的单位横截面的沉积物数量(沉积通量)约占总沉积物通量的 3%,射流主要沿平行射流轴线搬运沉积物。当沿射流轴线的沉积通量梯度小于 0,在底部一定有沉积物沉积。因此,沉积物沉积最多的位置一定是沉积通量变化最大的位置。河口坝形成之前,射流轴线位置等于分流河道口宽度的位置,沉积通量的差异最小。经过一段时间的沉积后,初始河口坝在射流轴线距离等于分流河道河口宽度处形成。

河口坝形成后,并不是静止的^[20]。河口坝形成后,最大压力点位于河口坝的迎流面,河口坝上部水流速度加速,并对河口坝顶部和表面进行侵蚀。随着河口坝后翼水深的增加,压力增大,水流速减弱,从迎流面侵蚀的沉积物在河口坝后翼沉积下来,导致河口坝前积。河口坝经常随时间的推移进积和加积,最后停止前积,开始变宽[图 4(c)]。但当河口坝进积或加积到一定程度,河口坝顶部足够高时(坝顶水深与湖水深度之比小于 0.4 时)^[28],在河口坝的迎流面将产生一定的流体压力,迫使水流从河口坝两侧绕过,而不是越过河口坝顶部,最终河口坝停止进积或停止生长。

综上,末端分流河道口,携带沉积物的水流以紊流射流形成初始河口坝(I级河口坝)。当 I 级河口坝进积、加积到一定程度,I 级河口坝停止生长,水流在 I 级河口坝两侧形成新的分流河道-河口坝体系(II 级分流河道-河口坝)。以此类推,在 II 级河口坝停止生长后,在其两侧将形成 III 级分流河道-河口坝。因此,在理想条件下,末端分流河道-河口坝内,每一级分流河道-河口坝的个数为 2^{n-1} 。

4 河口坝演化

4.1 现代三角洲前缘河口坝

鄱阳湖是一个吞吐型湖泊,湖底坡度约 0.1° ,平均水深 8.4 m ^[5]。赣江流入鄱阳湖发育河控三角洲,在三角洲前缘分流河道口发育河口坝[图 5(a)]。图 5 展示了 5 级分流河道-河口坝。当 I 级分流河道前方的河口坝进积、加积到一定程度(坝顶水深小于 3 m),该河口坝停止向前、向上生长。大部分水流在河口坝两翼迅速分流,并水道化。这些新的分流河道开始变得稳定,并且沿两个新分流河道的河道口发育 II 级河口坝,II 级河口坝开始进积、加积,直至河口坝顶部达到一定高度而终止,水流在 II 级河口坝两翼再次分流,水道化,最后形成 5 级分流河道-河口坝。

Edmonds 和 Slingerland^[28] 认为湖水深度、河道口宽度、河道口水流速度及水流携带沉积物粒度参数是影响河口坝长度和宽度的主要因素。由于当河口坝顶部水深与湖水深度之比小于 0.4 时,河口坝停止进积,河口坝长度则不再增加,所以在众多因素之中,湖水深度是影响河口坝长度最重要的因素。由紊流射流理论可知,河口坝限定在两射流外边界之间区域,而射流外边界与分流河道口的宽度密切相关(图 4),因此,河口坝的最大宽度在一定程度上也受河道口宽度的限制。

对于地形平缓的鄱阳湖湖底,末端分流河道-河口坝,各级分流河道其水深、水流速度以及沉积物粒度差异较小,因此,各级分流河道河口宽度则是影响河口坝长度的主要因素。通过对赣江三角洲前缘所发育的 22 组分流河道-河口坝的研究分析发现,河口坝长度与分流河道宽度呈指数相关,并且河口坝宽度与河口坝长度之间具有良好的线性相关性[图 5(b)]:

$$L_{\text{mb}} = 33.479e^{0.03W} \quad (R^2 = 0.8295) \quad (1)$$

$$W_{\text{mb}} = 0.2045L_{\text{mb}} + 9.3028 \quad (R^2 = 0.9407) \quad (2)$$

因此,已知分流河道的河口宽度情况下,可以利用分流河道口宽度与河口坝长度指数关系式以及河口坝宽度与河口坝长度之间的线性关系式对深埋地下的河

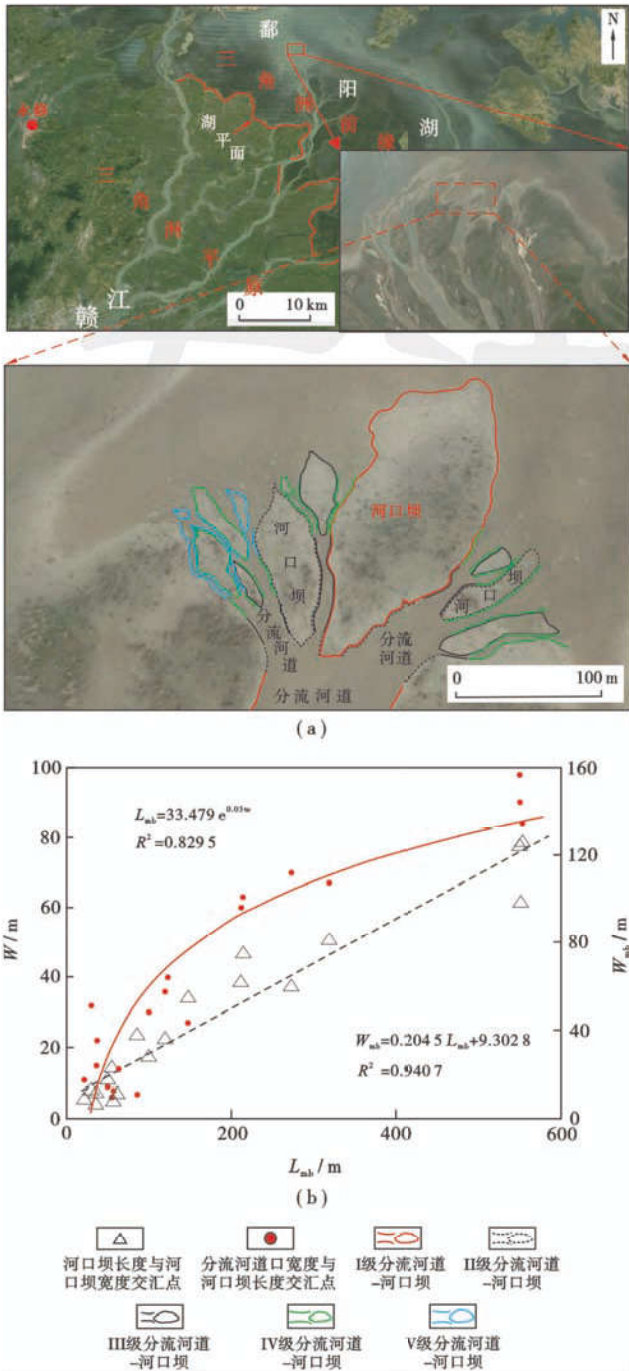


图5 赣江三角洲末端分流河道-河口坝(图像来自 Google Earth 软件,2011-12-03 拍摄)

Fig.5 Terminal distributary channel-mouth bar in the Ganjiang Delta

河口坝储层进行预测,提高储层预测的精度。除上述因素外,波浪与地形等也对河口坝的平面展布和形态具有重要的影响作用^[34-36]。

4.2 英79井区分流河道-河口坝演化及沉积模式

4.2.1 英79井区嫩江组三段河口坝长度、宽度预测

英79井钻、测井资料揭示,嫩江组三段发育三期分流河道-河口坝(图2),但由于研究区地震垂向分辨率的限制,地震剖面不能分辨单一流河道-河口坝。

研究区地层平缓,构造简单,由于分流河道-河口坝的水平宽度大于其厚度,因此,在利用合成地震记录对英79井嫩江组三段所发育的三期分流河道-河口坝顶底界面精细标定的基础上,按1×1网格对三维地震数据体进行精细解释,然后利用沿层切片技术对三期分流河道-河口坝平面特征及空间特征进行表征。将分流河道-河口坝底界对应的地震解释层位进行层拉平,然后沿该拉平后的层位向上以2ms时间间隔做切片。英79井合成地震标定结果显示,分流河道、河口坝所对应的弱振幅透镜状地震反射在14ms、16ms以及22ms时间间隔的沿层切片上呈北东向展布,前端呈条带状,末端呈朵状分布[图3(e),图6]。根据沿层切片以及式(1)和式(2)对英79井区嫩江组三段早、中和晚沉积期所发育的河口坝规模进行了预测(表1)。预测结果显示,英79井区嫩江组三段河口坝的长度和宽度具有良好的相关性,而沿层切片所能识别出的I级河口坝宽度与其对应的I级河口坝长度具有一定的指数相关性。

4.2.2 英79井区嫩江组三段分流河道-河口坝演化

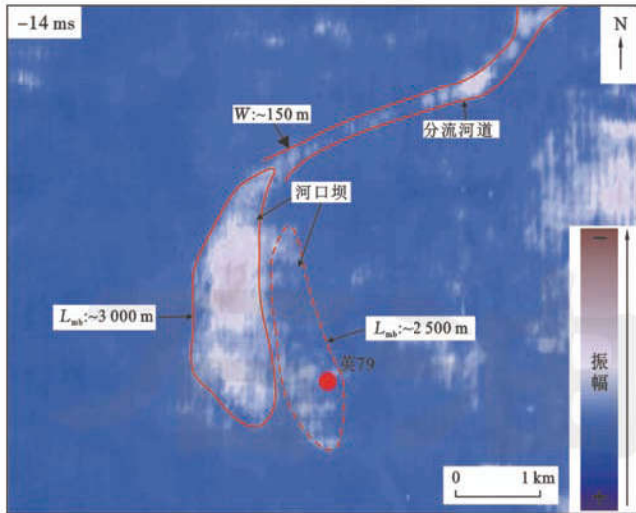
参照鄱阳湖赣江三角洲末端分流河道-河口坝沉积模式,基于测井、录井以及沿层切片对松辽盆地古龙凹陷英79井区嫩江组所发育的三期末端分流河道-河口坝的演化规律进行分析。

14ms沿层切片对早期末端分流河道-河口坝空间展布进行表征,可划分为2级[图6(a)];I级分流河道的河道口宽约150m,发育的河口坝长约3000m[式(1)计算河口坝长度约3013m,河口宽度与河口坝长度具有良好的指数相关性,表1],宽约610m[式(2)计算河口坝宽度约623m,河口坝宽度与河口坝长度具有良好的线性相关性,表1]。二级分流河道由于地震分辨率的限制,振幅切片未能清晰识别,二级河口坝长约2500m,宽约540m(表1)。英79井在嫩江组三段钻遇的早期10m厚的河口坝为二级河口坝[图2,图6(a)]。由于英79井钻遇的二级河口坝不一定位于该河口坝的坝顶部位,因此,河口坝的坝顶高度h至少10m。基于Edmonds和Slingerland^[28]数值模拟结论,当河口坝顶部水深与湖底水深之比小于等于0.4时,河口坝停止生长,则有公式:

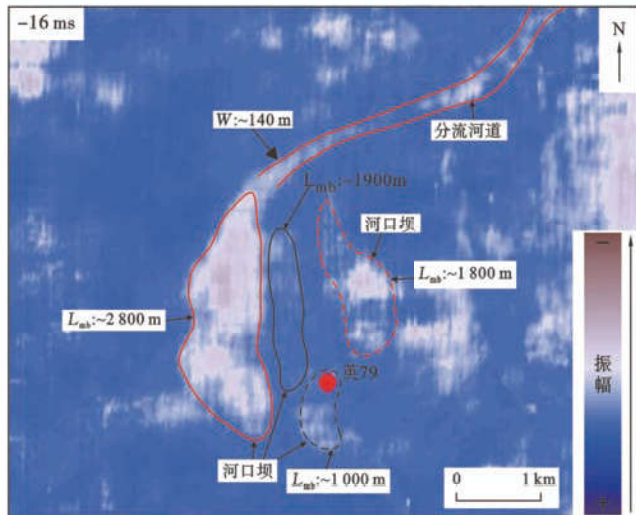
$$\frac{D-h}{D} \leq 0.4 \tag{3}$$

由式(3)可以推测当时水深至少17m。

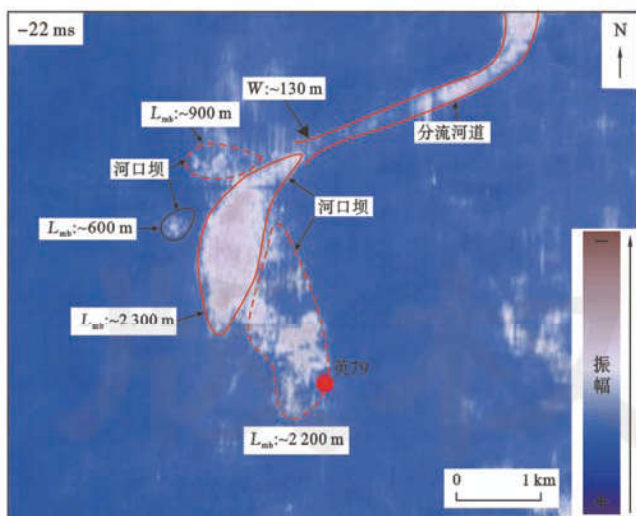
16ms沿层切片对中期末端分流河道-河口坝空间展布进行表征,可划分为4级[图6(b)];I级分流河道的河口宽度约140m,河口坝长度约2800m,宽约590m(表1)。II和III级分流河道地震切片未能识别,仅识



(a)



(b)



(c)



图 6 分流河道-河口坝演化

Fig. 6 Evolution of distributary channel-mouth bar

表 1 英 79 井区嫩江组三段河口坝长度、宽度预测

Table 1 Prediction of length and width of mouth bars in the 3rd Member of Nenjiang Formation in Well Ying79

时期	级别	地震预测河口宽度/m	地震预测河口坝长度/m	河口坝长度/m [式(1)]	地震预测河口坝宽度/m [式(2)]	河口坝宽度/m [式(2)]
早期	I级	150	3000	3013	610	623
	II级	-	2500	-	540	521
中期	I级	140	2800	2233	590	582
	II级	-	1800	-	410	377
	III级	-	1900	-	370	398
	IV级	-	1000	-	240	214
晚期	I级	130	2300	1654	520	480
	II级	-	900	-	220	193
	III级	-	2200	-	480	459
						132

注:“-”表示由于地震无法分辨而无数据。

别出 II 级河口坝(长约 1 800 m, 宽约 410 m)和 III 级河口坝(长约 1 900 m, 宽约 370 m)(表 1)。在 II 级河口坝和 III 级河口坝间形成的 IV 级分流河道, 并在其出口处发育 IV 级河口坝(长约 1 000 m, 宽约 240 m)(表 1)。英 79 井在嫩江组三段钻遇的 8.5 m 厚河口坝应为 IV 级河口坝[图 2, 图 6(b)], 粒度较细、规模较小, 推测当时的水深至少 14 m。而所钻遇的中期分流河道是由水流在 II 级和 III 级河口坝两侧分流并水道化形成的分流河道。

22 ms 沿层切片对晚期末端分流河道-河口坝空间展布进行表征, 可划分为 3 级[图 6(c)]: I 级分流河道的河道口宽度约 130 m, 对应的 I 级河口坝长度约 2 300 m, 宽约 520 m(表 1)。II 级和 III 级分流河道地震切片仍不能识别, 识别出 2 个 II 级河口坝(长度和宽度分别为 2 200 m、480 m 和 900 m、220 m, 表 1)和 1 个 III 级河口坝(长约 600 m, 宽约 160 m)。英 79 井在嫩江组三段钻遇的晚期 4.25 m 厚的河口坝应为 II 级河口坝前缘沉积[图 2, 图 6(c)], 推测当时水深至少 7 m。

从早期到晚期, 水深由 17 m 降至 7 m, 河口坝进积或加积空间逐步缩减, I 级河口坝长度分别为 3 000 m、2 800 m 和 2 500 m, 逐渐减小, 揭示湖水深度对河口坝长度具有一定的影响作用。另外, 沿层切片识别出的 I 级分流河道的河口宽度与其所对应的 I 级河口坝长度基本满足指数经验关系[式(1)]。尽管由于地震分辨率的限制, 仅有 3 组河口宽度与河口坝长度数据, 但说明河口宽度对河口坝长度仍具有一定程度的影响。因此, 在英 79 井区嫩江组三段, 湖水深度、分流河道的河口宽度对河口坝具有重要影响作用。

鄱阳湖湖底平均水深 8.4 m^[5], 水体较浅, 因而, 限制了河口坝加积和进积的空间, 河口坝发育规模相

对较小。而松辽盆地古龙凹陷英79井区嫩江组三段早期湖水深度至少17m,中期至少14m,与鄱阳湖相比,湖水较深,河口坝加积和进积空间较大,因此河口坝规模较大(河口坝长度600~3000m,宽度160~610m)(图5、图6和表1)。

另外由沿层切片所能识别的I级分流河道宽度(130~150m),也比现代赣江三角洲末端分流河道口宽度(5~80m)大(图5、图6和表1)。因此,受水深和河口宽度因素的影响,英79井区嫩江组末端分流河道-河口坝,其规模(分流河道宽度、河口坝长度)比鄱阳湖赣江三角洲末端分流河道-河口坝规模要大。河口坝形成及展布规律除了受分流河道的河口宽度和湖水深度影响之外,还受水流速度、沉积物粒度等因素的影响^[2,6,28]。今后,将加强研究现代鄱阳湖赣江三角洲末端分流河道出口处的水流速度、水流携带沉积物粒度、波浪因素对河口坝形成和展布规律的影响,以期对古代河口坝的研究提供更加合理的理论依据。

4.2.3 英79井区嫩江组三段分流河道-河口坝演化模式

在前述研究的基础上,总结了松辽盆地古龙凹陷英79井区嫩江组三段末端分流河道-河口坝演化模式(图7):松辽盆地古龙凹陷嫩江组沉积时期,盆地演化处于拗陷期,湖底平缓,在嫩江组嫩二段盆地湖水达到最高水位,之后湖平面逐渐下降。嫩江组沉积早期,湖水约17m,来自北东向物源注入湖泊,发育大型浅水缓坡三角洲。英79井区位于三角洲前缘部位,其中发育末端分流河道,并在分流河道出口处发育河口坝[图7(a)]。水流经过长距离搬运并受湖水顶托作用下,在末端分流河道口水流速度减弱、携带沉积物粒度较细,英79井区主要以泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和粉砂岩为主(图2)。携带细粒沉积物的水流在分流河道口以紊流射流形式喷射到湖水内,沉积物在射流外边界内形成初始河口坝沉积。在射流主段,沿射流轴线方向水流的减速以及垂直射流轴线方向水流向两侧的减速体现在沉积物粒度由近端河口坝向远端河口坝和由河口坝中心向两侧逐渐变细(图2)。初始河口坝形成以后,水流对初始河口坝迎水面侵蚀,而在河口坝后翼沉积,导致河口坝逐步进积、加积,初始河口坝长度和高度逐步增大。但当河口坝高度达到一定高度时,即河口坝的坝顶水深与坝底水深之比小于0.4时,河口坝迎水面一侧水流压力增大,大部分水流不能从坝顶流过,而是从河口坝两侧绕过,河口坝停止进积、加积,河口坝停止生长,I级分流河道-河口坝体系确立。而绕过I级河口坝两侧的水流,则水道化,并形成II级分流河道,携带沉积物的水流,在II级分流河道口形成II级河口坝。若湖水足够深、物源供给充分则会形成下一级分流河道-河口坝。嫩江组三段沉积中期,湖平面由17m下降至14m,英79井区发育4级分流河道-河口坝[图7(b)]。晚期湖水深度降至7m、I级分流河道河口宽度变为130m等原因,发育的I、II级河口坝规模均比早期的河口坝小。嫩江组三段沉积晚期,湖平面持续下降,英79井区发育3级分流河道-河口坝[图7(c)]。

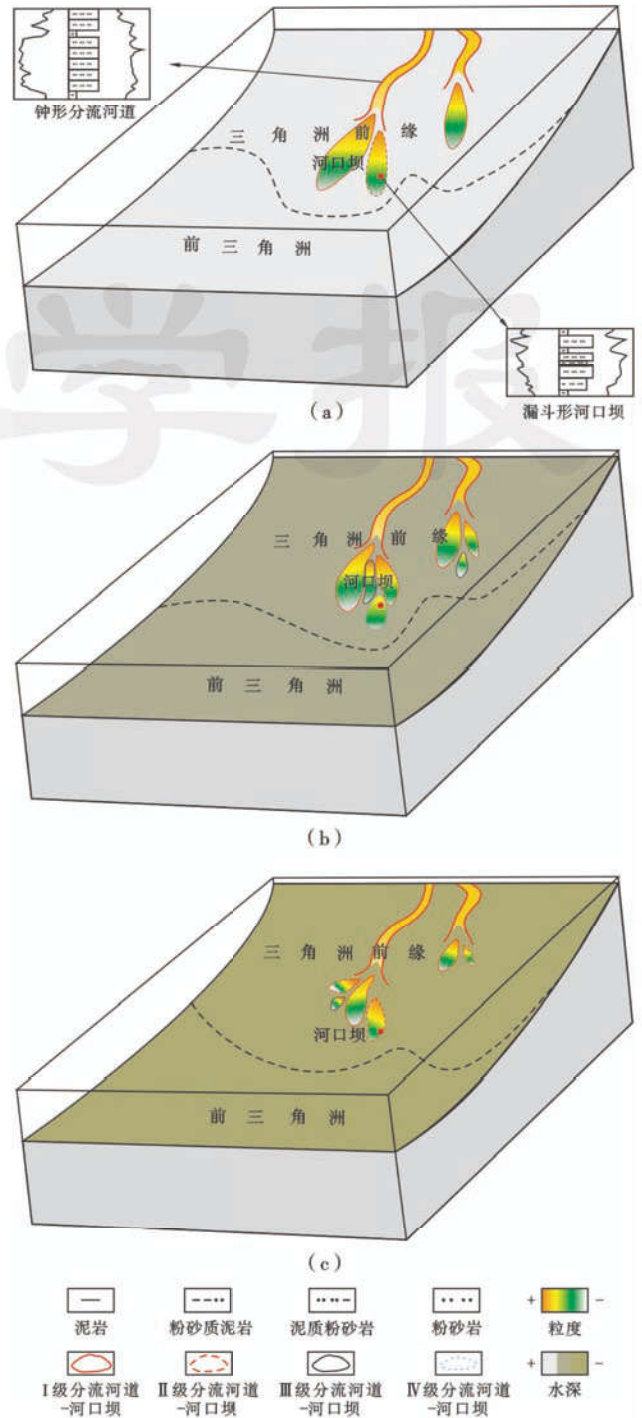


图7 末端分流河道-河口坝演化模式

Fig.7 Evolution model of terminal distributary channel-mouth bar

成II级分流河道,携带沉积物的水流,在II级分流河道口形成II级河口坝。若湖水足够深、物源供给充分则会形成下一级分流河道-河口坝。嫩江组三段沉积中期,湖平面由17m下降至14m,英79井区发育4级分流河道-河口坝[图7(b)]。晚期湖水深度降至7m、I级分流河道河口宽度变为130m等原因,发育的I、II级河口坝规模均比早期的河口坝小。嫩江组三段沉积晚期,湖平面持续下降,英79井区发育3级分流河道-河口坝[图7(c)]。

5 结 论

(1) 松辽盆地古龙凹陷英 79 井区嫩江组三段发育 3 期分流河道-河口坝。反旋回、漏斗状的河口坝在地震剖面上呈透镜状、高频、中弱振幅反射特征。英 79 井区三段由下至上,泥岩颜色由黑灰色、深灰色到灰绿色转变,河口坝厚度逐渐减薄(10 m、8.5 m 和 4.25 m),揭示从早期到晚期湖水由深变浅(17 m、14 m 和 7 m)。

(2) 分析现代鄱阳湖赣江三角洲和英 79 井区嫩江组三段发育的分流河道-河口坝表明,湖水深度和分流河道河口宽度是影响河口坝长度的主要因素。分流河道口宽度与河口坝长度呈指数相关,河口坝长度与河口坝宽度具有良好的线性相关性。

(3) 由于水深、分流河道的河口宽度不同,在分流河道末端发育不同级次、不同规模、展布特征差异的河口坝群。在理想条件下,末端分流河道-河口坝发育的各级分流河道-河口坝的个数为 2^{n-1} 。

(4) 结合钻、测井资料,利用三维地震切片技术,借鉴现代河口坝演化模式,总结了古龙凹陷嫩江组三段英 79 井区末端分流河道-河口坝演化模式。古龙凹陷英 79 井区嫩江组三段沉积时期,携带泥岩和粉砂岩为主的水流在末端分流河道出口处,以紊流射流方式注入湖水,形成早、中和晚 3 期反旋回的河口坝。3 期河口坝沉积时期,受湖水深度、水流携带沉积物粒度以及分流河道口宽度的影响,在末端分流河道口发育多级河口坝。

符号注释: n —河口坝级数, $n = 1, 2, 3, \dots$; L_{mb} —河口坝长度, m; W —分流河道口宽度, m; W_{mb} —河口坝宽度, m; R —相关系数, 无量纲; D —湖水深度, m; h —河口坝坝顶高度, m。

参 考 文 献

- [1] Fielding C R, Trueman J D, Alexander J. Sharp-based, flood-dominated mouth bar sands from the Burdekin River delta of north eastern Australia; Extending the spectrum of mouth-bar facies, geometry, and stacking pattern[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(1): 55-66.
- [2] Nardin W, Mariotti G, Edmonds D A, et al. Growth of river mouth bars in sheltered bays in the presence of frontal waves[J]. *Journal of Geophysical Research; Earth Surface*, 2013, 118(2): 872-886.
- [3] Ahmed S, Bhattacharya J P, Garza D E, et al. Facies architecture and stratigraphic evolution of a river-dominated delta front, Turonian Ferron sandstone, Utah, USA[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2014, 84(2): 97-121.
- [4] 段冬平, 侯加根, 刘钰铭, 等. 河控三角洲前缘沉积体系定量研究——以鄱阳湖三角洲为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(2): 270-277.

- Duan Dongping, Hou Jiagen, Liu Yuming, et al. Quantitative research of fluvial-dominated delta front sedimentary system; a case study of Poyang lake delta[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(2): 270-277.
- [5] 金振奎, 李燕, 高白水, 等. 现代缓坡三角洲沉积模式——以鄱阳湖赣江三角洲为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(4): 710-723. Jin Zhenkui, Li Yan, Gao Baishui, et al. Depositional model of modern gentle-slope delta; a case study from Ganjiang delta in Poyang lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4): 710-723.
- [6] Fagherazzi S, Edmonds D A, Nardin W, et al. Dynamics of river mouth deposits[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(3): 642-672.
- [7] 高志勇, 周川阔, 董文彤, 等. 浅水三角洲动态生长过程模型与有利砂体分布——以鄱阳湖赣江三角洲为例[J]. *现代地质*, 2016, 30(2): 341-352. Gao Zhiyong, Zhou Chuanmin, Dong Wentong, et al. Sedimentary processes, depositional model and sandbody prediction of lacustrine shallow water delta; a case study of Ganjiang river delta in Poyang lake[J]. *Geoscience*, 2016, 30(2): 341-352.
- [8] 张春生, 刘忠保, 施冬, 等. 三角洲分流河道及河口坝形成过程的物理模拟[J]. *地学前缘*, 2000, 7(3): 168-176. Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. Physical simulation of formation process in distributary channels and debouch bars in delta[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(3): 168-176.
- [9] 何文祥, 吴胜和, 唐义疆, 等. 河口坝砂体构型精细解剖[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(5): 42-46. He Wenxiang, Wu Shenghe, Tang Yijiang, et al. Detailed architecture analyses of debouch bar in Shengtuo oilfield, Jiyang depression[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(5): 42-46.
- [10] 辛治国. 河控三角洲河口坝构型分析[J]. *地质论评*, 2008, 54(4): 527-531. Xin Zhiguo. Architecture analyses of debouch bar of fluvial dominated delta[J]. *Geological Review*, 2008, 54(4): 527-531.
- [11] 温立峰, 吴胜和, 王延忠, 等. 河控三角洲河口坝地下储层构型精细解剖方法[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2011, 42(4): 1072-1078. Wen Lifeng, Wu Shenghe, Wang Yanzhong, et al. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in mouth bar of fluvial dominated delta[J]. *Journal of Central South University; Science and Technology*, 2011, 42(4): 1072-1078.
- [12] 梁宏伟, 吴胜和, 王军, 等. 基准面旋回对河口坝储集层微观非均质性影响——以胜坨油田三区沙二段 9 砂层组河口坝储集层为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(4): 436-442. Liang Hongwei, Wu Shenghe, Wang Jun, et al. Effects of base-level cycle on mouth bar reservoir micro-heterogeneity; a case study of Es2-9 member of Shahejie Formation mouth bar reservoirs in Shengtuo oilfield[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(4): 436-442.
- [13] 陈清华, 周宇成, 孙珂, 等. 永安镇油田永 3 断块沙二下河口坝储层结构单元划分及其意义[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2014, 38(2): 10-16. Chen Qinghua, Zhou Yucheng, Sun Ke, et al. Architectural elements division of debouch bar of lower Es2 submember in Yong 3 fault-block reservoir bar in Yong'an Zhen oilfield and its significance[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2014, 38(2): 10-16.
- [14] 杨延强, 吴胜和. 陡坡型扇三角洲上一类特殊类型河口坝的研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(1): 97-103. Yang Yanqiang, Wu Shenghe. Study of a unique type of mouth

- bar deposition in steep slope-type fan deltas[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(1): 97-103.
- [15] Miall A D. The geology of fluvial deposits; sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996: 75-178.
- [16] Enge H D, Howell J A, Buckley S J. The geometry and internal architecture of stream mouth bars in the Panther Tongue and the Ferron Sandstone Members, Utah, U. S. A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(11): 1018-1031.
- [17] Olariu C, Steel R J, Petter A L. Delta-front hyperpycnal bed geometry and implications for reservoir modeling: Cretaceous Panther Tongue delta, Book Cliffs, Utah[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(6): 819-845.
- [18] Schomacker E R, Kjemperud A V, Nystuen J P, et al. Recognition and significance of sharp-based mouth-bar deposits in the Eocene Green River Formation, Uinta Basin, Utah[J]. *Sedimentology*, 2010, 57(4): 1069-1087.
- [19] Li Yangyang, Bhattacharya J. Facies architecture of asymmetrical branching distributary channels; Cretaceous Ferron Sandstone, Utah, U. S. A. [J]. *Sedimentology*, 2014, 61(5): 1452-1483.
- [20] Fan Hui, Huang Haijun, Zeng T Q, et al. River mouth bar formation, riverbed aggradation and channel migration in the modern Huanghe (Yellow) River delta, China[J]. *Geomorphology*, 2006, 74(1/4): 124-136.
- [21] He Yufang, Cheng Heqin, Chen Jiyu. Morphological evolution of mouth bars on the Yangtze estuarine waterways in the last 100 years[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(2): 219-230.
- [22] 刘君龙, 纪友亮, 杨克明, 等. 浅水湖盆三角洲岸线控砂机理与油气勘探意义[J]. *石油学报*, 2015, 36(9): 1060-1073, 1155.
- Liu Junlong, Ji Youliang, Yang Keming, et al. Mechanism of lake shoreline control on shoal water deltaic sandbodies and its significance for petroleum exploration; a case study of Penglaizhen Formation in the middle part of western Sichuan depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(9): 1060-1073, 1155.
- [23] 林承焰, 张宪国, 董春梅. 地震沉积学及其初步应用[J]. *石油学报*, 2007, 28(2): 69-72.
- Lin Chengyan, Zhang Xianguo, Dong Chunmei. Concept of seismic sedimentology and its preliminary application[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(2): 69-72.
- [24] 王建功, 王天琦, 张顺, 等. 松辽拗陷盆地水侵期湖底扇沉积特征及地球物理响应[J]. *石油学报*, 2009, 30(3): 361-366.
- Wang Jianguo, Wang Tianqi, Zhang Shun, et al. Sedimentary characteristics and geophysical response of sublacustrine fan during transgress period in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(3): 361-366.
- [25] 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 等. 砂岩成岩相地震预测——以松辽盆地齐家凹陷青山口组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 266-274.
- Zeng Hongliu, Zhu Xiaomin, Zhu Rukai, et al. Seismic prediction of sandstone diagenetic facies; applied to Cretaceous Qingshankou Formation in Qijia depression, Songliao Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 266-274.
- [26] 朱筱敏, 赵东娜, 曾洪流, 等. 松辽盆地齐家地区青山口组浅水三角洲沉积特征及其地震沉积学响应[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 889-897.
- Zhu Xiaomin, Zhao Dongna, Zeng Hongliu, et al. Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of shallow-water delta of Qingshankou Formation in Qijia area, Songliao Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 889-897.
- [27] 曾洪流, 赵贤正, 朱筱敏, 等. 隐性前积浅水曲流河三角洲地震沉积学特征——以渤海湾盆地冀中拗陷饶阳凹陷肃宁地区为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 566-576.
- Zeng Hongliu, Zhao Xianzheng, Zhu Xiaomin, et al. Seismic sedimentology characteristics of sub-clinoformal shallow-water meandering river delta; a case from the Suning area of Raoyang sag in Jizhong depression, Bohai Bay basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 566-576.
- [28] Edmonds D A, Slingerland R L. Mechanics of river mouth bar formation; Implications for the morphodynamics of delta distributary networks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(F2): F02034.
- [29] 冯志强, 张顺, 付秀丽. 松辽盆地姚家组—嫩江组沉积演化与成藏响应[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 78-88.
- Feng Zhiqiang, Zhang Shun, Fu Xiuli. Depositional evolution and accumulation response of Yaojia-Nenjiang Formation in Songliao basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 78-88.
- [30] 黄薇, 张顺, 张晨晨, 等. 松辽盆地嫩江组层序构型及其沉积演化[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 920-927.
- Huang Wei, Zhang Shun, Zhang Chenchen, et al. Sequence configuration and sedimentary evolution of Nenjiang Formation in the Songliao basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 920-927.
- [31] 张晨晨, 张顺, 魏巍, 等. 松辽盆地嫩江组 T-R 旋回控制下的层序结构与沉积响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(12): 2618-2636.
- Zhang Chenchen, Zhang Shun, Wei Wei, et al. Sedimentary filling and sequence structure dominated by T-R cycles of the Nenjiang Formation in the Songliao basin[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(2): 278-296.
- [32] Canestrelli A, Nardin W, Edmonds D, et al. Importance of frictional effects and jet instability on the morphodynamics of river mouth bars and levees[J]. *Journal of Geophysical Research; Oceans*, 2014, 119(1): 509-522.
- [33] 平渡. 射流理论基础及应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1995: 74-126.
- Ping Jun. Basic principles of jet flow and their applications[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1995: 74-126.
- [34] Nardin W, Fagherazzi S. The effect of wind waves on the development of river mouth bars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(12): L12607.
- [35] Leonardi N, Canestrelli A, Sun Tao, et al. Effect of tides on mouth bar morphology and hydrodynamics[J]. *Journal of Geophysical Research; Oceans*, 2013, 118(9): 4169-4183.
- [36] Esposito C R, Georgiou I Y, Kolker A S. Hydrodynamic and geomorphic controls on mouth bar evolution[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(8): 1540-1545.