

耿红柳,胡 勇,周军良,等. 渤海古近系扇三角洲精细研究及有利储层预测[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(4): 39-47.

# 渤海古近系扇三角洲精细研究 及有利储层预测

耿红柳,胡 勇,周军良,赵军寿,邓 猛

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300459)

**摘要:**研究区位于渤中凹陷与黄河口凹陷之间,其沙三段为扇三角洲沉积,而由于埋藏深、储层致密、砂体分布规律认识不清等因素,严重制约了油田的开发,因此,确定沙三段扇三角洲砂体展布规律、识别有利储层成为开发地质重点研究内容。沙三段沉积时期处于渤海湾盆地第 2 次裂陷作用时期,为典型的断陷湖盆,研究区沙三段层序处于湖扩体系域,靠近盆缘断裂,扇三角洲向湖盆方向发育,并随湖平面上升呈退积型沉积。本次研究参考退积型扇三角洲野外露头特征,通过井震结合,利用井位电性特征与地震同相轴对应关系及地震时频分析对扇三角洲期次进行划分;通过统计地震资料沟谷分布,对扇三角洲水下分流河道分布及走向进行刻画,进一步根据井位砂体厚度与井间距关系式对砂体尖灭位置进行定量表征,利用以上方法将各期砂体展布情况进行描述;通过对低渗储层形成影响因素进行分析,对油田沙三段有利储层进行预测,为油田下步调整提供依据。

**关键词:**扇三角洲;时频分析;边界定量表征;储层预测

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2019.04005

## 0 引言

扇三角洲(Fan delta)的概念最早在 1965 年由 Holmes<sup>[1]</sup>提出:从邻近高地推进到一静止水体(海或湖)中的冲击扇,一般发育在独特的古地理、古构造背景下,常常紧靠山地前缘或构造形成的断层、陡崖一侧。扇三角洲是断陷盆地盆缘断裂处极为发育的一种沉积体系,同时也是重要的油气储集体之一<sup>[2,3]</sup>,因此对扇三角洲的研究备受国内外学者的重视。随着研究的深入,有些学者总结了不同扇三角洲的沉积特征和沉积模式,更

有学者对扇三角洲内部构型进行过研究,但其主要针对井距较小的密井网区<sup>[4]</sup>,对于海上井距较大的区域,尤其是中深层,对扇三角洲的精细研究存在较大难度。本次研究区位于渤海海域南部,渤中凹陷与黄河口凹陷交界处、渤南低凸起西倾末端,是一个被近 SW—NE 向断层与近 E—W 向断层所切割的断裂背斜构造(图 1),为异常高温高压构造-岩性油气藏<sup>[5]</sup>,主力含油层位为新生界古近系沙河街组沙二段和沙三段,笔者主要针对沙三段扇三角洲期次及各期次扇体发育特征展开研究。

依据油田开发井实钻结果,研究区沙三段埋深主要为-3 500~-3 900 m,结合渤海海域地层层序表划分,沙三段属于沙三段层序中下部。根据岩性特征可将沙三段地层分为上下两段,上段为一套厚层暗色泥岩,下段为深灰色泥岩与灰色砂岩互层、夹薄层钙质粉砂岩。本次研究的目的是层段即为沙三段下段(即储层段)。前人研究发

收稿日期:2018-10-15

基金项目:中国海洋石油总公司科技攻关项目(CNOOC-KJ125ZDXM07LTDTJ02)

作者简介:耿红柳(1985—),女,硕士,工程师,主要从事油田开发地质类相关研究工作。E-mail:genghl3@cnoc.com.cn

现,沙三段储层以岩屑长石砂岩为主,成分和结构成熟度均较低<sup>[6]</sup>。本次利用岩心资料、地震资料、

测井资料描述沙三段储层段扇三角洲沉积展布及特征,并指出有利储层分布。

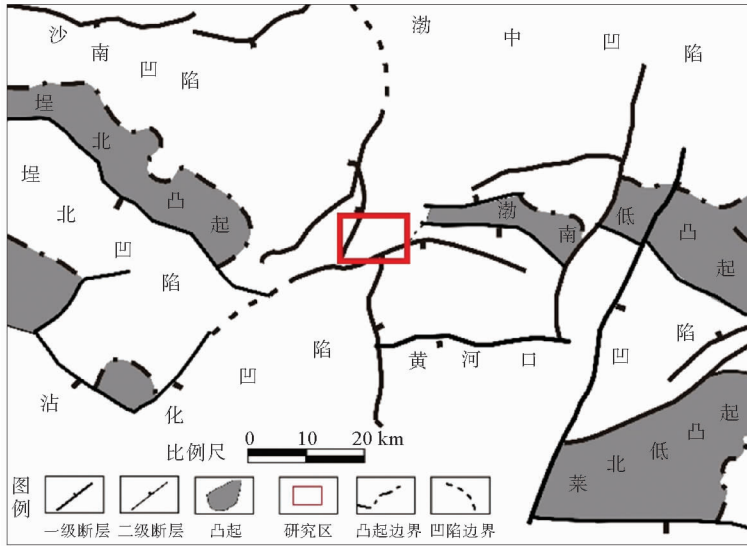


图1 研究区位置图

Fig. 1 The location of the study area

## 1 沉积背景

受古构造、古地形、水动力条件等不同因素的控制,扇三角洲在不同沉积环境影响下形成不同的沉积演化体系,其扇体的范围、形态也有不同的表现<sup>[7-9]</sup>。根据沉积物供给速率和可容纳空间增长速率的关系可划分为退积型扇三角洲、加积型扇三角洲、进积型扇三角洲<sup>[10-11]</sup>。

沙三段沉积时期处于渤海湾盆地第2次裂陷作用时期,为典型的断陷湖盆,根据1井古生物资料分析,沙三段由下到上藻类含量及喜湿类孢粉含量逐渐上升,代表其处于湖平面逐渐上升时期。研究区沙三段层序处于湖扩域,靠近盆缘断裂,扇三角洲向湖盆方向发育,并随湖平面上升呈退积型沉积。

## 2 扇三角洲扇体表征

退积型扇三角洲是盆地可容空间增长速率大于沉积物供给速率的背景下发育的,总体显示为一个湖泊逐渐扩张、沉积体系逐渐向盆地边缘退积的沉积过程。在垂向上一般表现为整体向上变

细的岩性特征,内部可能由多个期次的扇三角洲体系垂向叠加<sup>[12]</sup>。本次研究充分利用井震资料,对研究区扇三角洲期次进行明确划分,并对各期扇三角洲沉积展布进行定量分析。

### 2.1 期次划分

为准确表征扇体沉积特征,首先需要对扇体发育期次进行划分,对扇体期次的划分即对期次界面的表征。期次界面表征的常规方法是识别目的层基准面旋回界面,划分过程中主要应用钻井取心资料识别冲刷面、洪泛面、粒序突变面和岩相转换面,然后用取心井标定测井曲线、建立基准面旋回测井响应标准,对非取心井完成基准面旋回识别。鉴于研究区取心资料匮乏,且储层为砂泥薄互层结构,无法利用取心资料进行期次界面的识别,本次期次划分主要通过测井曲线响应特征及时频分析技术进行期次识别。

通过测井资料对界面进行表征需要寻找测井曲线出现变化的节点,这种变化必须是在各井或大部分井上有响应的变化。在这个思路指导下,对全区井位曲线特征进行对比,大部分井伽马曲线有基线变化的现象,这种现象是由不同期次扇体沉积造成。结合各井测井曲线的旋回特征及岩

电组合特征,对比认为沙三段扇三角洲可划分为四期(图 2、3),各期均具有向上变细的正旋回特

征,从岩性上来看,各期旋回底部均发育厚度相对较厚的含砾砂岩,其测井曲线呈箱形或钟形,向上

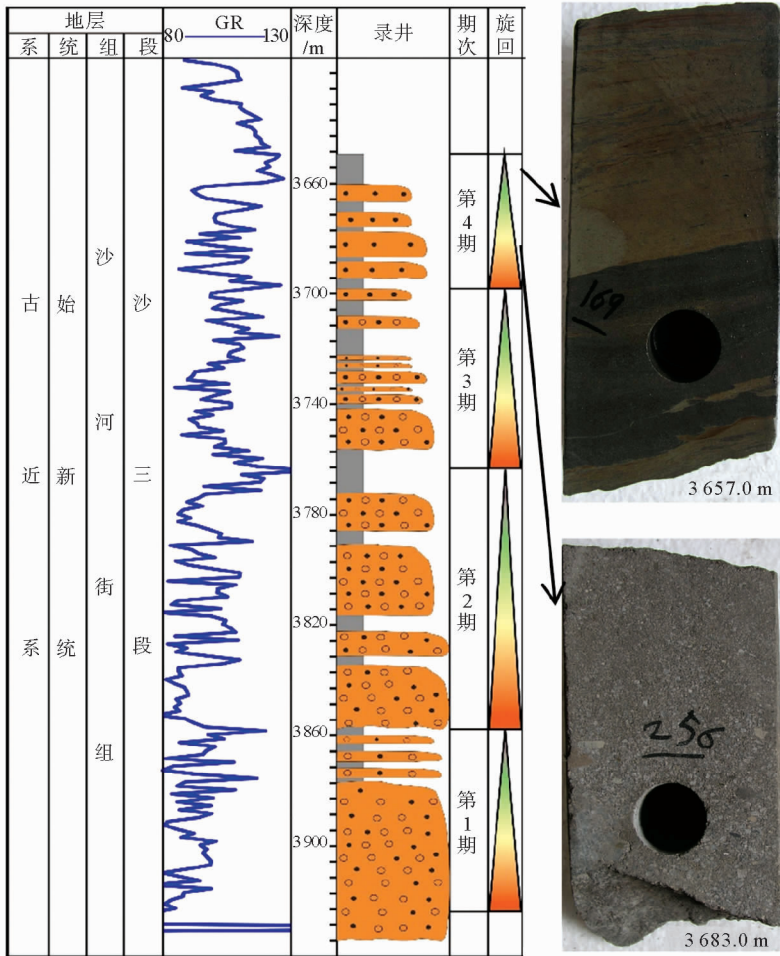


图 2 5 井扇三角洲期次划分

Fig. 2 Development stages of a fan delta of Well 5

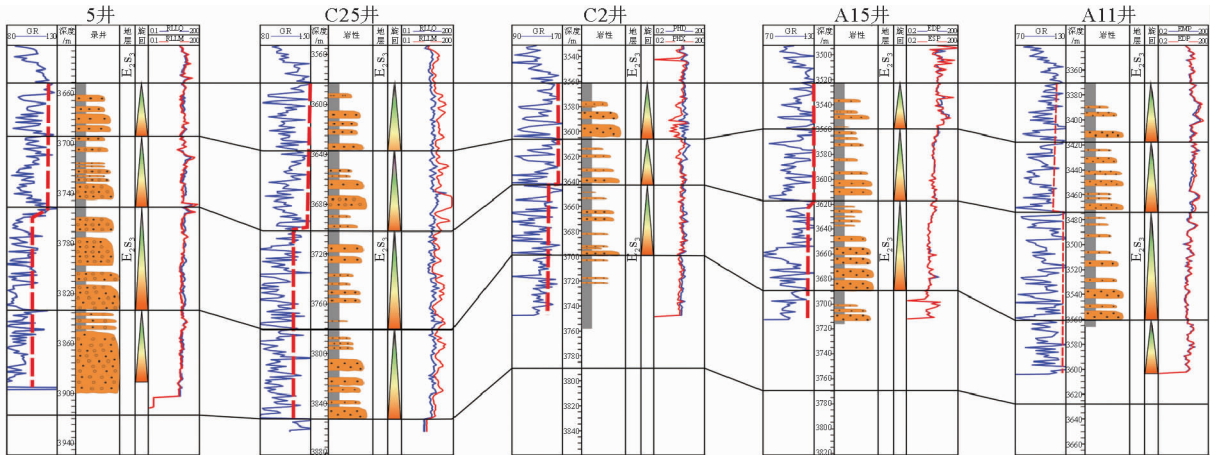


图 3 研究区扇三角洲期次划分

Fig. 3 Stratigraphic framework of the fan delta in study area

砂岩逐渐变薄呈现砂泥薄互层结构,测井曲线呈钟形、指形,到旋回顶部则发育一套泥岩。旋回顶部发育较厚泥岩向上突变为较厚砂岩即为旋回分界面。

由于研究区井距较大,井控程度较低,造成研究区期次界面准确性较差,为了降低稀井网造成的期次界面识别误差,对无井控区域进行期次界面识别,需要进一步依靠地震资料进行分析,地层的沉积根据湖平面的升降表现出相应的韵律性和旋回性,而这种旋回恰好与时频分析的方向性具有一致的特点<sup>[13,14]</sup>,这种沉积旋回性会使地震波场中波的频谱沿时间方向出现一定的差异,这种差异可以用时频分析方法显现出来,同时时频分

析结果也可以用来推测沉积纵向上的旋回特征及旋回界面。根据这一特点,利用对研究区1井所在测线位置利用自适应时频分析(AOK)方法得到其2 400~2 820 ms时窗内的时频剖面。随着湖平面的上升,研究区所形成的地层序列为多个正序列旋回,垂向剖面上单个旋回岩性下粗上细、厚度下大上小,在时频剖面上表现为频率往上变大的趋势(图4),利用该方法对5口探井均提取了时频剖面,分析结果与旋回对比结果具有较好的吻合关系,说明在研究区利用该技术进行期次界面识别是可靠的。最终确定研究区钻遇沙三段可划分为4期旋回,为扇三角洲各期扇体精细研究提供了较可靠的期次界面。

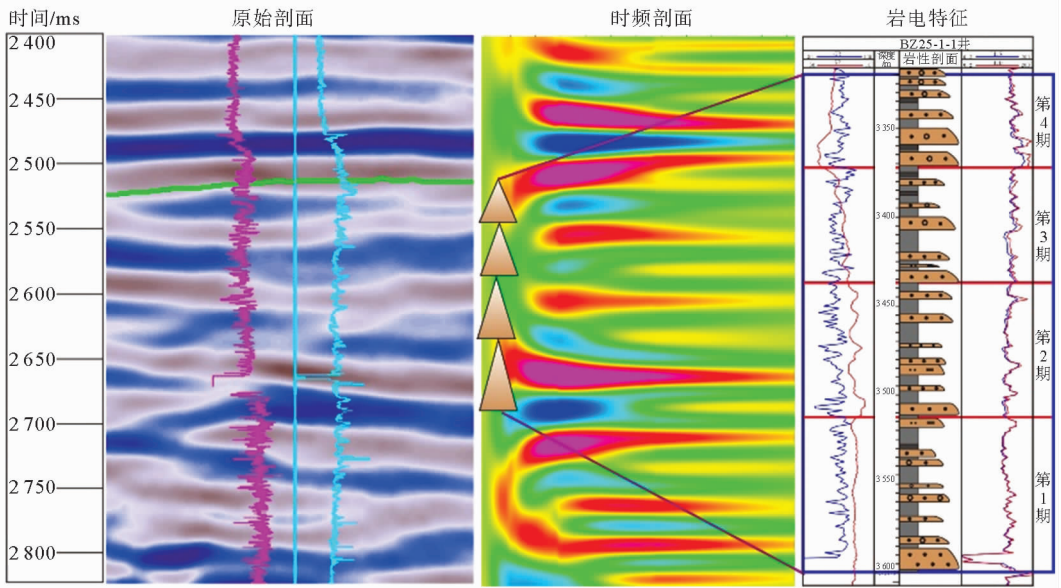


图4 时频分析

Fig. 4 Time-frequency analysis

## 2.2 扇三角洲表征

砂体描述的前提是物源方向,砂岩主要由石英、长石和岩屑组成,其中石英属于稳定组分,搬运距离越远其相对含量越高,可以通过石英的含量来推断物源方向<sup>[15]</sup>,岩屑的成分同样可以反映母岩的性质,由于物源不同岩屑中不同类型岩屑的含量往往不同。一般而言,搬运距离越远,岩石中的稳定组分含量越高。通过统计研究区5口探井砂岩及岩屑组分(图5),可确定研究区物源来自西方,沿沟谷向西北方发育。

井距较小的(平均<150 m)密井网区,综合利用取心、测井资料能够准确刻画出砂体边界、表征扇体内各微相展布特征<sup>[16]</sup>。本研究区平均井距548 m(表1),井网较稀,岩心及测井资料不足,且扇三角洲沉积具有相变快速的特点,这为研究区扇体内砂体展布研究增加了难度与不确定性。

为解决以上难题,确定研究区扇体边界、砂体发育规模,本次研究在期次划分的基础上,统计各井各期扇体的砂体厚度与井距,利用砂体厚度与井距的回归关系式确定扇体尖灭点(图6),以此定量表征各期扇体的砂体边界,最终确定4期扇

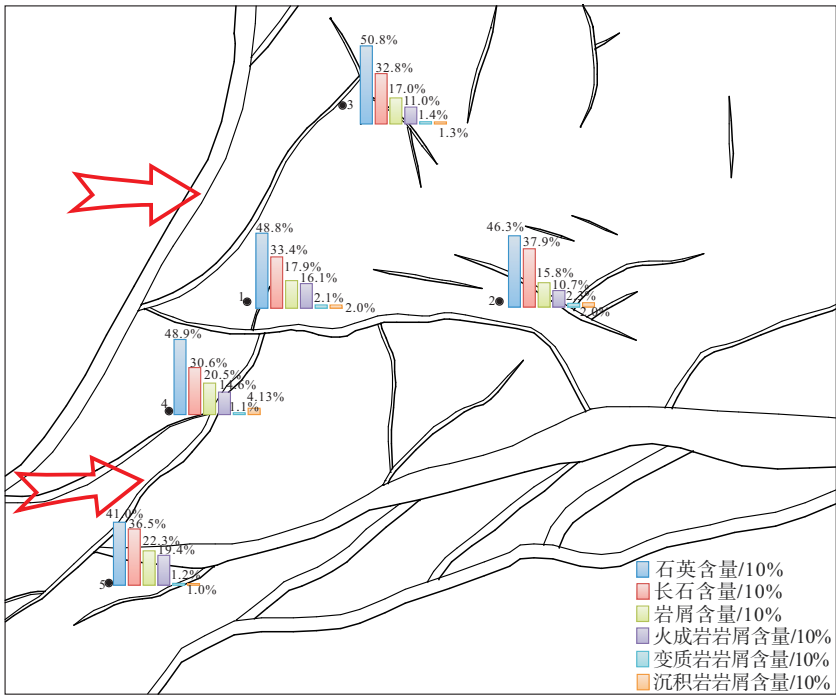


图 5 研究区砂岩及岩屑组分分析

Fig. 5 Analysis of sandstone and debris Lithological fragments

表 1 研究区井距统计表

Table 1 Well space statistics of the study area

井名 1-井名 2	井距/m	井名 1-井名 2	井距/m	井名 1-井名 2	井距/m
C33-C13	517	A4-A15	319	A6-A11	832
C33-C25	570	A4-A1	555	A5-A12	734
C33-C11	597	A2-A11	608	A6-B4	540
C11-C25	532	A7-A11	431	A20-A22	646
C2-A17	202	A5-A11	373	A2-A7	623
C2-A15	364	A12-A11	878	平均值	548

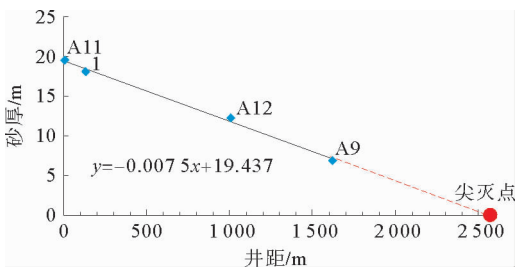


图 6 扇三角洲砂厚与井距回归曲线

Fig. 6 Relation between sand stone thickness and well space for fan delta

体边界,各期扇体的规模由下而上有逐渐变小的趋势,呈退积型沉积。

为达到进一步刻画扇体内部沉积微相的目的,在扇体边界约束下,充分挖掘地震资料,对扇

体内的沟谷(图 7)进行统计,初步确定水下分流河道走向;对油田内所有井进行单井相分析(表 2),统计对比后发现,水下分流河道相分布与沟谷分析结果基本一致:油田范围内共有 2 条水下分流河道,由西向东发育,北侧水下分流河道发育一条分支,南侧水下分流河道发育 2 条分支。

在水下分流河道主流线确定的基础上,结合单井相分析对连井剖面相进行了刻画(图 8),进而对扇体内部沉积微相进行平面展布特征的刻画,并绘制 4 期扇体平面展布特征图:4 期扇体整体上由下至上呈缓慢退积的特征,局部范围退积特征不明显。平面上两条水下分流河道均由西向东发育,其中北侧水下分流河道发育一条分支,主河道砂体沿河道方向由 4 井区向 1 井区推进并向

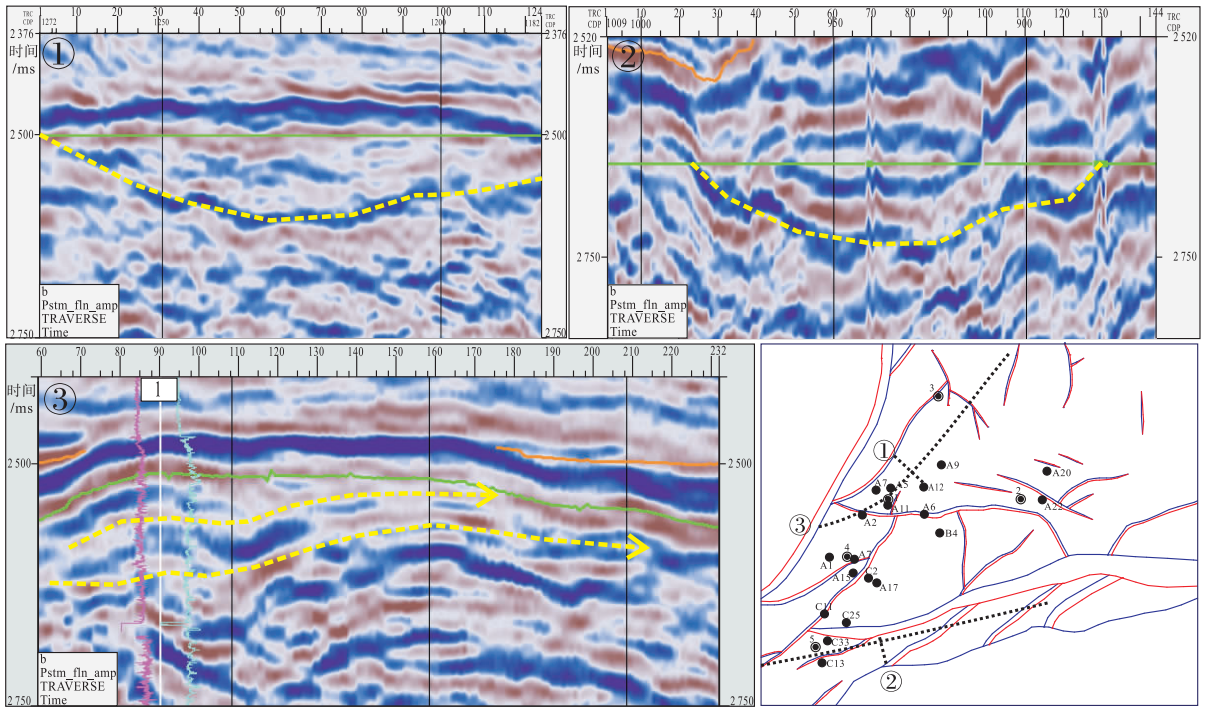


图7 研究区沟谷分布特征

Fig. 7 The characteristics of valley distribution in the study area

表2 单井相特征

Table 2 The facies characteristics of single well

微相类型	GR 曲线	岩心照片	岩性	沉积构造
水下分流河道			灰色油斑粗砂岩	由底部向上呈正韵律沉积
前缘席状砂			灰色泥岩夹多套薄层粉细砂岩	薄层粉细砂岩发育水平层理
湖相			深灰色厚层状泥岩, 局部夹粉砂岩	泥岩中发育水平纹层

A9 井、3 井变薄尖灭；分支河道砂体由 4 井区向 B4 井区中部发育并与南侧水下分流河道分支相交。南侧水下分流河道发育 2 条分支，主河道砂体由 5 井区西侧向东侧发育，延伸 4 000 多米后

逐渐变薄尖灭；北侧分支河道由 5 井区东侧向北发育，穿过 C11 井区，于 B4 井区与北侧水下分流河道的分支河道相交；南侧分支河道由 5 井区东侧向南东方向发育至边界大断层处(图9)。南侧

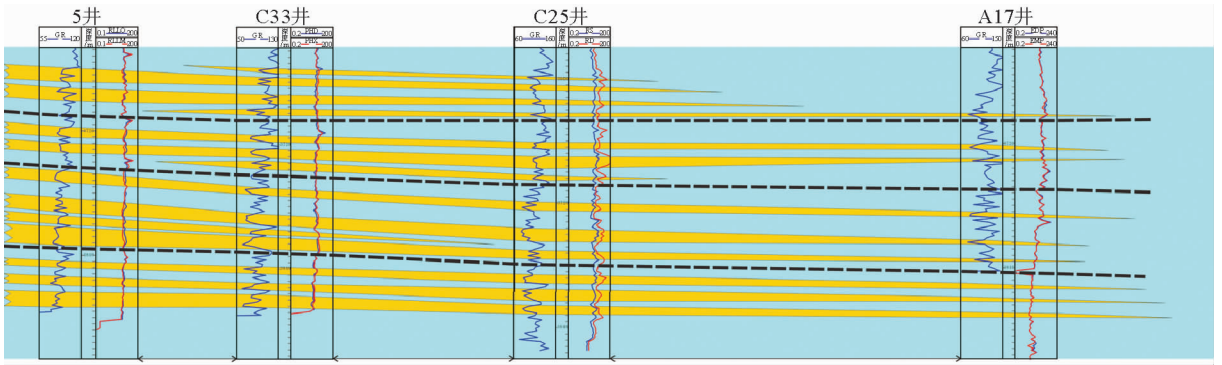


图 8 剖面沉积相图(顺物源方向)

Fig. 8 The sedimentary facies section of profile(along the source direction)

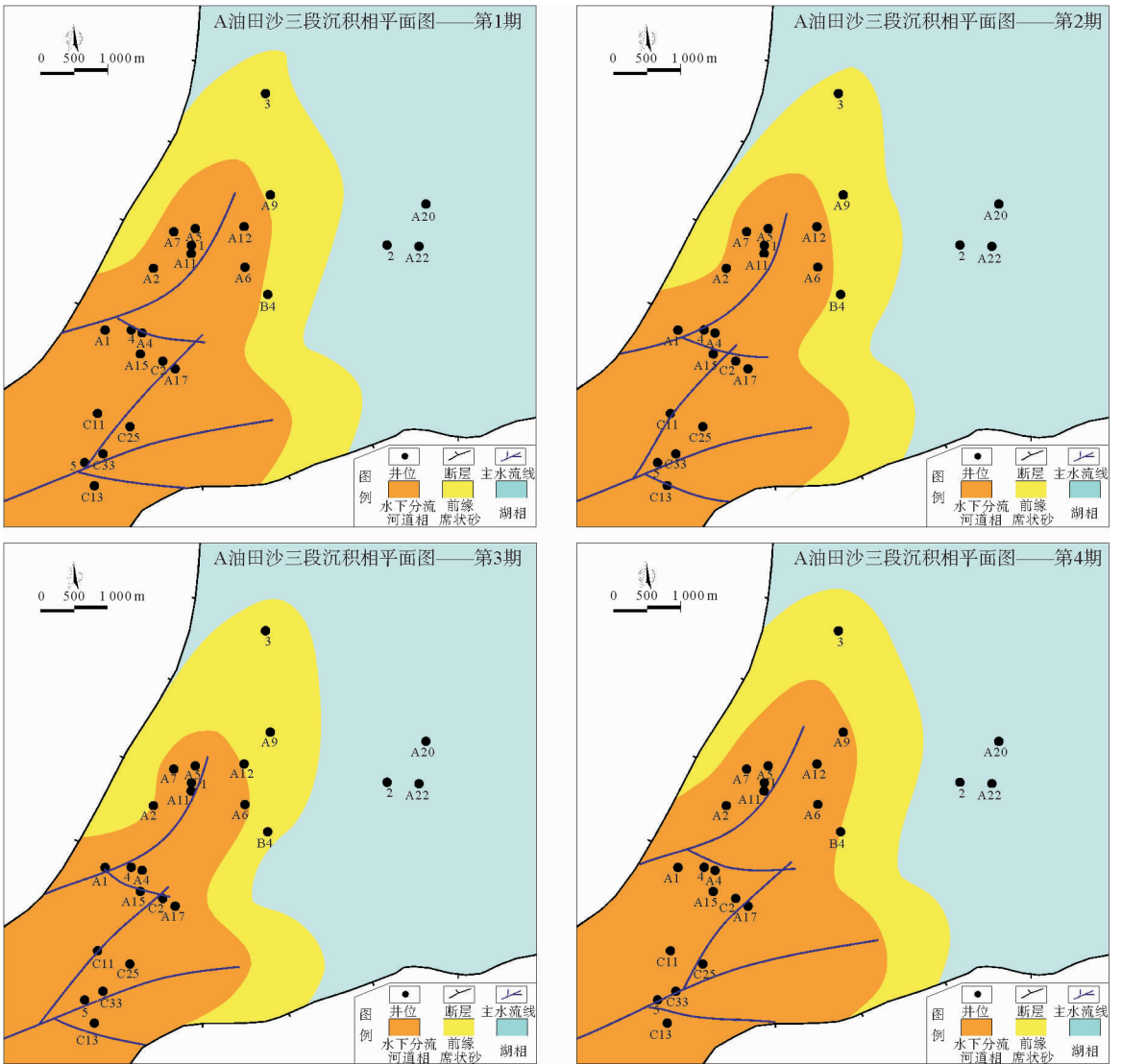


图 9 扇三角洲沉积相图

Fig. 9 Sedimentary facies map of a fan delta

水下分流河道整体厚度较北侧河道偏厚,推测这种特征是由于研究区南部较北部构造低,南部沉积物可容空间较大,且更靠近物源,沉积物厚度相应较厚(图9)。

### 3 有利储层预测及开发方式推荐

#### 3.1 有利储层预测

研究区沙三段储层段表现为低渗特征,平均孔隙度 13.9%,平均渗透率  $7.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,属于中一低孔、低渗—特低渗储层,渗透率是控制研究区储层品质的主要因素。

##### 3.1.1 低渗成因及主控因素

在沙三段扇三角洲沉积中,粒度粗细与砂岩厚度是控制砂岩物性的主要因素。5井虽然埋深比1、2、3、4井都大,但孔隙度渗透率比其他井高,且顺物源方向物性逐渐变差。说明粒度与砂层厚度对物性有明显控制。近物源扇中亚相的粒度粗、砂层厚、水道中央的物性比远源细粒薄层扇缘好。

近物源地区砂体厚度大、粒度粗、抗压实能力强,因而早期压实作用减孔较弱,粒间体积保存较多。早期经历了石英、长石次生加大以及碳酸盐胶结,烃源岩排烃生成有机酸强烈溶蚀长石、碳酸盐胶结物,生成次生孔隙。晚期随着黏土矿物向伊利石转化,与泥岩接触的部位再次发生一期碳酸盐胶结,充填部分次生孔隙。

远物源地区砂体厚度小、粒度较细、抗压实能力弱,早期压实作用后保存粒间孔隙较少。经历了石英、长石次生加大以及碳酸盐胶结,进一步破坏原生孔隙、堵塞喉道,因而有机酸缺乏运移通道,导致后期溶蚀作用也较弱。同时,由于砂体较薄,整体均发生强烈胶结,几乎充填全部次生孔隙,导致储层致密化。

##### 3.1.2 有利储层预测

沙三段有利储层主要控制因素为粒度粗细与砂岩厚度,而粒度粗细与砂岩厚度是由沉积控制,即沉积的有利相带为储层有利区域。研究区在平面上的水下分流河道相带为有利储层分布区域,5井区、B4井区、1井区为水下分流河道的主体区,为平面上的有利区;纵向上受退积型沉积影响由

下向上储层物性变好,对于平面上的主体区,纵向上由下向上储层物性变好,即储层上部为其有利储层位置,对于主体区边缘区域,砂体向上退积并逐渐尖灭,纵向上下部为有利层段。

#### 3.2 开发方式推荐

根据本文指出有利储层分布,于平面上将有利储层分为三部分,分别推荐不同的开发方式:

**南部5井区** 5井区位于扇三角洲前缘的根部,砂体沉积相对较厚,按照单层开采不能达到充分控制,推荐分为上下两段,分别实施水平压裂井进行开发;

**中部4、B4井区** 该井区较南部5井区砂体厚度相对变薄,推荐水平井压裂开发;

**北部1井区** 1井区位于水下分流河道沉积的端部,砂体变薄、隔夹层变多变厚,推荐定向井注水开发。

### 4 结论与认识

通过充分挖掘各资料相关性,经精细研究得出以下结论:

(1)研究区沙三段沉积模式为湖平面逐渐上升环境下的缓慢退积扇三角洲沉积。

(2)根据地震时频分析及旋回对比,研究区扇三角洲沉积由下至上可划分为4期,每期均发育2条由西向东的水下分流河道,河道走向控制着沉积方向;纵向上4期扇三角洲呈缓慢退积特征,主体区同一井点向上储层物性变好,边缘区同一井点向上储层退积尖灭。

(3)研究区平面上的水下分流河道相带为有利储层分布区域,纵向上上部层系为有利储层。在有利储层预测的基础上指出了3种不同储层区域的推荐开发方式,为油田更有效开发提出了建议。

#### 参考文献:

- [1] Homels A. Principles of Physics Geology [M]. London: Thomas Nelson and Sons Ltd, 1965: 288.
- [2] 杨帆,贾进华.塔里木盆地乌什凹陷白系冲击扇-扇三角洲沉积相及有利储盖组合[J].沉积学报,2006,24(5):681-689.
- [3] 冯斌,王冠民,赵峰华,等.济阳拗陷桩西潜山披覆构造带



- 桩 96 井区沙二段扇三角洲沉积特征[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(6): 27-29.
- [4] 宋 璠, 杨少春, 苏妮娜, 等. 扇三角洲前缘储层构型界面划分与识别[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2015, 30(1): 7-13.
- [5] 邓运华, 李建平. 渤中 25-1 油田勘探评价过程中地质认识的突破[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(6): 646-652.
- [6] 李慧勇, 辛仁臣, 李 强, 等. 黄河口凹陷 A 区古近系沙河街组三段沉积相[J]. 古地理学报, 2007, 9(1): 25-32.
- [7] 文 全. 海拉尔盆地地下白垩统扇三角洲沉积特征[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(3): 17-21.
- [8] 纪友亮, 李清山, 王 勇, 等. 高邮凹陷古近系戴南组扇三角洲沉积体系及其沉积相模式[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 10-19.
- [9] 朱筱敏, 信荃麟. 湖泊三角洲的重要特性[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994, 18(3): 6-11.
- [10] 杨剑萍, 赵卫卫, 姜在兴. 沾化凹陷孤北油田古近系沙三段扇三角洲沉积特征及油气储层意义[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(2): 157-161.
- [11] 邓宏文, 王红亮, 翟爱军, 等. 中国陆源碎屑盆地地层层序与储层展布[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 108-114.
- [12] 辛艳朋, 牟中海, 郭维华, 等. 退积型扇三角洲高分辨率层序地层学研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(2): 68-71.
- [13] 吴国忱, 康仁华, 印兴耀. 三维时频分析方法在地震层序分析中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(1): 81-84.
- [14] 董 波. 时频分析在地层旋回性分析中的应用[J]. 华北地震科学, 2004, 22(4): 16-19.
- [15] 杨 锐, 彭德堂, 潘仁芳, 等. 鄂尔多斯盆地西南部上古生界盒 8 段物源分析[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(3): 1-5.
- [16] 陈 程, 孙义梅, 贾爱林. 扇三角洲前缘地质知识库的建立及应用[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 53-57.

## A DETAILED STUDY OF PALEOGENE FAN DELTA IN BOHAI SEA FOR PREDICTION OF FAVORABLE RESERVOIRS

GENG Hongliu, HU Yong, ZHOU Junliang, ZHAO Junshou, DENG Meng  
(Bohai Oilfield Research Institute, CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300452, China)

**Abstract:** The study area is located in the overlapping area of the Bozhong sag and Huanghekou sag. The reservoirs of the 3d Member of the Shahejie Formation is a kind of deeply buried and compact fan deltaic sand body distributed in an unclear pattern, by which the development of oil fields is severely restricted. Therefore, to identify the favorable reservoirs and to define the fan delta sand body distribution pattern of the 3rd Member of the Shahejie Formation have become the major concern of the development geologists. The 3rd Member of the Shahejie Formation is the product of the second stage of rifting of the Bohai Bay Basin, and therefore, the study area is a typical fault basin. Sequence stratigraphic study suggests that the 3<sup>rd</sup> Member was the deposits of transgressive system tract near the basin edge fault. Fan deltas were well developed in the direction towards the lake center. With the rise in lake level, fan deltas retrograded. Taking the retrograded fan-delta outcrops and their characteristics as references to carry out well seismic correlation, using the corresponding relationship between well electrical characteristics and seismic events, conducting seismic time-frequency analysis for division of development stages of fan deltas, and making the statistical distribution of seismic data in valleys, we described the underwater distributary channels of the fan deltas and their trend. Further, according to the relation between sand body thickness and well distance quantitatively to define the position of the pinchout line. Using the above method to describe the distribution of sand bodies and the controlling factors of low permeability reservoir. Upon the basis, prediction of favorable reservoir is carried out as a clue for adjustment of oil production.

**Key words:** fan delta; time-frequency analysis; quantitative characterization of boundary; reservoir prediction