文章编号:1673-5005(2017)02-0060-10

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2017.02.007

### 地震波形指示反演在东营凹陷王家岗地区 沙四上亚段滩坝砂的应用

韩长城1,林承焰1,2,任丽华1,2,马存飞1,魏 婷3,张宪国1,2,孙志峰1

(1.中国石油大学球科学与技术学院,山东青岛 266580;2.山东省油藏地质重点实验室,山东青岛 266580;3.中国石油新疆油田分公司石西油田作业区,新疆克拉玛依 834000)

摘要:以东营凹陷王家岗沙四上亚段滩坝砂为例,在层序地层格架建立的基础上,利用沉积学原理,基于贝叶斯理论将地震、测井和地质统计学信息融合为地层模型参数的后验概率分布,采用 Metropolis-Hastings 抽样算法对后验概率分布随机抽样,获得反演解,从而预测有利滩坝相带。结果表明:东营凹陷王家岗地区沙四上亚段低位域发育滩坝砂,其中准层序组2沉积时期以坝砂为主,砂体厚且横向分布稳定,而准层序组1和准层序组3沉积时期滩砂和坝砂间互发育,砂体厚度相对较小;湖侵域和高位域主要发育碳酸盐岩滩坝,滩坝砂零星状分布。该方法体现了相控的思想,预测结果更符合地质规律,在东营凹陷沙四上亚段滩坝储层预测中取得了较好的效果,为同类型储层预测提供了有利支持。

关键词:波形指示反演;贝叶斯理论;沙四上亚段;滩坝砂

中图分类号:TE 122.1 文献标志码:A

**引用格式:**韩长城,林承焰,任丽华,等. 地震波形指示反演在东营凹陷王家岗地区沙四上亚段滩坝砂的应用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(2):60-69.

HAN Changcheng, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Application of seismic waveform inversion in  $Es_4^s$  beach-bar sandstone in Wangjiagang area, Dongying Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2017,41(2):60-69.

# Application of seismic waveform inversion in $Es_4^s$ beach-bar sandstone in Wangjiagang area, Dongying Depression

HAN Changcheng<sup>1</sup>, LIN Chengyan<sup>1,2</sup>, REN Lihua<sup>1,2</sup>, MA Cunfei<sup>1</sup>, WEI Ting<sup>3</sup>, ZHANG Xianguo<sup>1,2</sup>, SUN Zhifeng<sup>1</sup>

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Key Laboratory of Reservoir Geology in Shandong Province, Qingdao 266580, China;

3. Shixi Oil Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, China)

Abstract: The focus of the paper is the upper part of the fourth member of Shahejie Formation  $(Es_4^*)$  in Wangjiagang area, Dongying Depression. Based on Bayesian theory, a posterior probability density function of subsurface models was developed by establishing sequence stratigraphy framework, integrating the principles of sedimentology and information from seismic, well logs and geostatistics. The Metropolis-Hastings algorithm was applied to obtain an exhaustive characterization of the posterior probability density to predict the favorable beach-bar sedimentary facies. Results show that in the beach-bar sand development in the lowstand system tract (LST) of the  $Es_4^*$ , the bar sand is well developed, relatively thick, has large scale distribution, and less lateral variation in the second order para-sequence. The bar sand is interbedded with beach sand, and the overall thickness of the sand is relatively small in the first and third order para-sequences. The lacustrine transgressive system tracts (TST) and the highstand system tracts (HST) are mainly developed the carbonate beach-bar, and are less developed in sandy

收稿日期:2016-05-13

作者简介:韩长城(1984-),男,博士研究生,研究方向为油气藏开发地质。E-mail:517892849@qq.com。

beach-bar. The aforementioned method is facies-controlled, which yields results that are more consistent with the geological observations. The proposed method works preferably in the  $\text{Es}_{4}^{s}$ , but may also be applied to other types of reservoirs.

**Keywords:** waveform indication inversion; Bayesian theory; upper part of the fourth member of Shahejie Formation  $(Es_4^s)$ ; beach-bar sand

近年来,随着中国油气勘探开发进入中---高勘探 阶段,油气勘探技术逐渐成熟,油气勘探逐步进入隐 蔽油气藏勘探阶段,滩坝砂岩储层逐渐引起人们的关 注<sup>[1]</sup>。国内外许多学者对滩坝的地质特征和识别预 测技术进行了大量研究,滩坝砂具有单层砂体厚度 薄、横向变化快、地震资料纵向分辨率低等特点。朱 筱敏等[2]、陈世悦等[3]根据滩坝的主要物质组成将其 分为砂质滩坝和生物碎屑滩坝,杨勇强等<sup>[4]</sup>建立了陆 相断陷湖盆的滩坝沉积模式,刘书会等<sup>[5]</sup>利用地震属 性对滩坝薄砂体进行了预测,才巨宏<sup>[6]</sup>、韩宏伟<sup>[7]</sup>等 利用波形分析技术和地震特征反演技术对滩坝储层 进行了预测,黄捍东等<sup>[8]</sup>通过非线性随机反演方法对 陆相薄砂岩储层进行了预测。这些研究成果均较好 地指导了滩坝勘探,但仍然存在较多问题,地震属性 多解性较强:波阻抗反演分辨率太低.无法满足薄层 需求;测井约束反演高频分量主要来源于初始阻抗模 型,多解性强;地质统计学反演随机性较强,对井位分 布要求较高。笔者基于相控模型的高精度反演,在层 序地层格架约束下,运用沉积学基本原理,充分利用 地震波形的横向变化反映储层空间的相变规律,实现 滩坝储层和沉积相带的预测。

#### 1 反演方法原理

#### 1.1 目标函数建立

在地震勘探中,由声波计算得到的波阻抗曲线 通常表示为

Y=X+N. (1) 式中,Y为由声波计算得到的波阻抗值;X为待求解 的地下地层实际波阻抗值;N为随机噪音,一般情况 下,假设N为服从高斯分布的平衡白噪音,其数学 期望为0,协方差为σ。

由于||**Y-X**||<sup>2</sup> 与 N 一样均符合高斯分布,因此可以确定其目标函数为

$$J_1 = \frac{\|Y - X\|^2}{2\sigma^2} \,. \tag{2}$$

波阻抗反演过程就是通过公式(2)研究 X 为何 值时使 J<sub>1</sub> 达到最小。由于地震资料带限宽度的限 制,只能提供波阻抗反演的中频成分,而高频和低频 成分则主要通过测井数据、地质信息获得<sup>[9]</sup>。波阻 抗反演存在不稳定性和多解性,仅使用一种方法很 难获得较理想解,因此须在目标函数中引入先验信 息对其进行约束,从而获得较稳定的反演解。在统 计方法中,通常采用最大后验估计,则目标函数为

 $J(Z) = J_1(Z) + \lambda^2 J_2(Z).$  (3) 即可表示为测量数据估算可信度项与先验项的和。 其中 Z 为波阻抗,先验项  $J_2(Z)$ 可以定义为势函数 的和,是与测井资料、地质信息等先验信息有关的函数。 数。 $J_1(Z)$ 为与某些后验信息有关的函数。 $\lambda$  为平 滑参数,用于协调  $J_1(Z)$ 和  $J_2(Z)$ 之间相互影响,为 常数。公式(3)进一步改写为

$$J(\mathbf{Z}) = \frac{\|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\|^2}{2\sigma^2} + \lambda^2 \varphi^k(\mathbf{Z}) = \frac{\|\mathbf{Y} - \mathbf{X}\|^2}{2\sigma^2} + \lambda^2 \sum_{c} \varphi(D_c^k(\mathbf{Z})/\delta).$$
(4)

式中,φ 为势函数;λ 和δ为正则参数,λ 用于平衡数 据项和先验项之间的相互影响,δ 是一种刻度参数, 调节不连续处梯度值<sup>[10]</sup>。公式(4)由两部分组成, 第一部分是关于测量模型和数据之间的某种一致 性,当其值达到最小时,一致性会变得很好,但解稳 定性变差;第二部分是关于解"光滑性"的测量标 准,当其值取最小时,获得的近似解较稳定。

## 1.2 MCMC 方法和 Metropolis-Hastings 抽样准则

马尔科夫链蒙特卡罗(MCMC)方法是在贝叶斯 框架下,用已有资料进行约束,既可使最优解满足参 数的统计特性,同时融入了先验信息,解的精度得到 提高<sup>[11]</sup>。其基本思想是:通过构建一个平稳分布为  $\pi(x)$ 的马尔科夫链来获得  $\pi(x)$ 的样本,被估计的 模型参数值是链的状态空间,被估计的后验分布为 链的贝叶斯后验分布。

利用 MCMC 方法对贝叶斯理论下的后验概率 分布进行随机抽样,反演问题希望得到的是所估参 数的后验概率分布,因此各个参数的马尔科夫链应 收敛于所估计参数的后验概率分布<sup>[11]</sup>。

设 *M* 为某一空间,*n* 为产生的总样本数,*m* 为马 尔科夫链达到平稳时的样本数,则 MCMC 的思路 为<sup>[12]</sup>:

(1)构建一条 Markov 链,使其收敛至平稳分布  $\pi(x)$ ,常用的构造转移方法是 Gibbs 抽样和 Metrop-

olis-Hastings 抽样。

(2)产生样本。由 *M*中的某一点 x<sup>(0)</sup>出发,用
(1)中的 Markov 链进行抽样模拟,产生点序列:x<sub>1</sub>, …,x<sub>n</sub>。

(3)蒙特卡罗积分。任一函数*f*(*x*)的期望估计为

$$E[f(x)] = \frac{1}{n - m_{t=m+1}} f(x^{(t)}).$$

Metropolis-Hastings 抽样的基本思路<sup>[12]</sup>是:选择一转移函数  $q(x;x^{(i-1)})$  和初始值  $x^{(0)}$ ,若第 i 次迭 代开始时的参数值为  $x^{(i-1)}$ ,则第 i 次迭代过程为

(1)从 $q(x;x^{(i-1)})$ 中抽取一个备选值x';

(2) 计算接受概率:  $\alpha$  ( $x^{(i-1)}, x'$ ) = min  $\left\{\frac{\pi(x^{(i-1)};x')}{\pi(x^{(i-1)}q(x';x^{(i-1)})}\right\};$ 

(3) 以概率  $\alpha(x^{(i-1)}, x')$ ,置  $x^{(i)} = x'$ ,以概率 1- $\alpha(x^{(i-1)}, x')$ ,置  $x^{(i)} = x^{(i-1)}$ ;

(4) 重复(1) ~ (3) 步 n 次,则可以得到后验样 本 x<sup>(1)</sup>, x<sup>(2)</sup>, x<sup>(3)</sup>…x<sup>(n)</sup>,从而可计算后验分布的各阶 矩以进行统计推理。

### 2 技术流程

波形指示反演技术流程如图1所示。首先对测 井资料处理,包括测井曲线标准化、重构和敏感曲线 分析,建立层序地层格架,沉积特征及沉积相特征分 析;然后分析测井数据和地震波形特征,参照样本空



Fig. 1 Flow chart of waveform indication inversion

间分布距离和曲线分布特征,优选与待判别道波形 特征相似程度较高的样本井建立初始模型,统计其 纵波阻抗建立先验概率函数;将初始模型与地震波 阻抗体进行匹配滤波,求得似然函数,对样本进行多 尺度分解,逐步滤除高频成分;最后基于贝叶斯理 论,联合似然分布与先验分布得到后验概率分布,并 将其作为目标函数;基于波形指示优选的样本在空 间上具有较好的相关性,采用 Metropolis-Hastings 抽 样算法对后验概率分布抽样,选取目标函数最大值 时的解作为可行随机实现,求取多次可行实现的均 值作为期望输出。

### 3 应用实例

东营凹陷王家岗地区沙四上亚段主要发育滩坝 相沉积,滩坝砂岩油藏是其中一种重要的岩性油藏 类型<sup>[13]</sup>,分布面积广、认识程度较低,但勘探潜力巨 大。实际勘探开发中往往会遇到一系列困难:岩性 组合为砂泥岩薄互层,单层砂体多小于2m,储层物 性差,横向连续性差,分布规律难以掌握;同时地震 资料主频低,目的层段约为30Hz,有效频带范围10 ~70Hz,目的层速度约为2000m/s,地震资料对储 层的分辨能力偏低,对滩坝砂岩储层地震相特征认 识不清,导致滩坝砂体识别和预测难度大<sup>[14-16]</sup>。

#### 3.1 区域地质背景

渤海湾盆地是中国东部最重要的含油气盆地, 济阳坳陷位于渤海湾盆地的东南部,其中东营凹陷 位于济阳坳陷的东南部,是渤海湾盆地中一个重要 的三级构造单元。王家岗地区位于东营凹陷南斜坡 的东段,其西北部为牛庄洼陷,东北部为广利洼陷, 东部为八面河断裂鼻状构造带,南部为广饶凸起。 构造位置处于近东西向陈官庄-王家港断裂带与东 北向八面河断裂鼻状构造带交汇处,西南部为近北 西向纯化草桥断裂鼻状构造带(图2)。

#### 3.2 层序地层格架建立

建立层序地层格架为开展储层预测和沉积相研 究提供了地震地质的等时格架,在地震沉积相研究 中不可缺少。王家岗地区沙四上亚段为一个完整的 三级层序<sup>[17]</sup>,应用初次湖泛面和最大湖泛面将其划 分为低水位体系域、湖侵体系域和高水位体系域三 个体系域<sup>[18]</sup>。沙四上亚段顶界面在地震剖面上对 应于 T6 反射层,反射特征为强振幅、强连续反射,全 区内可以较大范围追踪,为沙四段与沙三段的分界 面;沙四上亚段层序内部以沉积作用转换面 T7 为 界,为低水位体系域向湖侵体系域过渡面,地震剖面 上中强振幅、中连续反射特征;T7′为沙四上亚段和 沙四下亚段的分界面。湖泊低水位体系域对应准层 序组1、准层序组2和准层序组3,准层序组1湖泊 水体较浅,准层序组2时期水体开始逐渐变浅至准 层序组3时最浅,主要发育砂泥间互的滩坝相沉积; 湖侵体系域对应准层序组4,湖泊水体开始快速上 升,发育一套分布稳定高导泥岩;高水位体系域对应 于准层序 5、准层序组 6 和准层序组 7,早期湖泊水 体深且湖平面稳定,沉积厚层泥岩,晚期水位逐渐下 降,有一定量的沉积物供应,形成一定分布范围的滩 坝相沉积(图 3)。



图 2 东营凹陷区域构造





图 3 东营凹陷南北向层序地层剖面



#### 3.3 主要技术环节

#### 3.3.1 测井曲线处理

由于测井仪器误差等因素导致测井数据出现偏 差,采用频率直方图法进行测井资料的标准化处理; 统计分析寻找对岩性变化比较敏感的测井曲线,通 过交会分析认为波阻抗曲线对砂泥岩区分较差,砂 岩和泥岩部分阻抗值重叠(图4(a)),无法用现有 波阻抗曲线进行反演,但自然电位曲线对砂泥岩区 分较好。通过对声波曲线重构,提高地震反演的分 辨率和精度,将声波中体现地层背景速度的低频信 息与岩性敏感曲线自然电位曲线的高频信息通过信 息融合技术进行融合,形成重构声波曲线。通过重 构声波曲线得到的波阻抗对砂岩和泥岩的区分较好(图4(b))。



图 4 王家岗地区滩坝砂岩和泥岩波阻抗概率直方图

#### Fig. 4 Histogram of impedance of beach-bar sandstone and mudstone in Wangjiagang area, Dongying Depression

3.3.2 子波提取

子波的准确提取是地震反演的基础和关键。本 文中根据地震资料的统计特性和测井资料的特点,采 用循环迭代法子波提取。其一般提取流程为:首先使 用地震道的自相关性计算初始子波的振幅谱,结合测 井曲线确定初始子波的相位谱(假定为线性相位);然 后利用振幅谱和相位谱的信息合成一个理论雷克子 波,用理论子波合成的记录初步进行标定。在初步标 定的基础上,提取井旁地震道实际地震子波,用该子 波制作合成记录并重新调整时深关系。如此反复,直 至得到相位振幅谱变化稳定的精细子波。

#### 3.3.3 频率参数设置

频率参数影响反演的分辨率,控制反演结果的 有效频带范围。地震资料有效信息主要集中在中 频;测井曲线属于宽频带信息,能够为反演提供低频 信息和高频信息;在地震波形指示反演中,低频成分 主要从测井资料中获取,中频成分通过地震资料求 取,高频成分是在地震波形指示下进行的随机模拟 结果,整个过程是由确定到随机的逐步过渡,随机成 分较少。本次反演的低频参数和高频参数优选如 下:低频参数中高通频率取 8 Hz,高截频率取 15 Hz;高频参数中低截频率取 70 Hz,低通频率取 110 Hz,高通频率取 300 Hz,高截频率取 350 Hz。

#### 3.4 沉积相类型及波形特征

3.4.1 碎屑岩滩坝

根据东营凹陷沙四段上亚段岩心、录井、测井等 资料将碎屑岩滩坝划分为滩砂和坝砂,其具有不同 的沉积特征(图5)。

滩砂亚相发育于滨浅湖地区,平行岸线分布<sup>[1]</sup>,砂层多而厚度薄,平面上呈席状或带状广泛 分布,物性较差,沉积构造主要有波状层理、浪成砂 纹层理、冲洗交错层理及压扁层理等,可见植物根化石。根据沉积砂体厚度、粒度、分布特征等进一步分为滩席和滩脊两种微相<sup>[19]</sup>。滩席微相砂体粒度细,岩性为灰色泥质粉砂岩、粉砂岩,砂泥岩频繁薄互层,砂体厚度小于2m,自然电位曲线为中低幅锯齿状;滩脊微相岩性以粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩为主,自然电位曲线为中高幅锯齿状。

坝砂亚相分布在滩砂中,粒度相对较粗。砂体 单层厚,呈条带状或透镜状,分布面积较小,物性较 好,沉积构造主要有平行层理、波状层理、浪成砂纹 层理和块状层理,见植物根化石、介壳化石等。坝亚 相包括坝主体和坝边缘两种微相类型。坝主体微相 是主体部分,粒度粗,岩性以厚层相对均质的灰褐色 粉砂岩、粉细砂岩为主,粒序呈反韵律或复合韵律, 自然电位曲线为中高幅漏斗形、箱形组合型。坝边 缘微相岩性主要为灰色粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质 泥岩,粒序呈反韵律或复合韵律,自然电位曲线为中 幅漏斗形或指形。

滨浅湖泥以灰色、深灰色泥岩、页岩为主,砂体不 发育,自然电位曲线为低幅或微幅齿形或平滑线形。 3.4.2 碳酸盐岩滩坝

碳酸盐滩坝多分布于靠近物源区且无大量陆源 碎屑物质供给的湖湾地区<sup>[20]</sup>。岩性主要为黄色页 状灰岩、深灰色碎屑石灰岩和灰质页岩,滩单层厚度 多小于2m,坝单层厚度多大于2m,感应电导率、声 波时差为低值尖峰,电阻为高值,自然电位曲线值较 高,低幅齿形。

#### 3.4.3 波形特征

根据正演模拟及样本井处沉积特征,分析不同 岩性组合特征的波形特征:①坝砂亚相单砂层厚度 较大,地震反射波形特征为半极值宽度大、幅度小、 反射能量中等的中幅单峰波形, 且坝砂反射振幅与 坝砂厚度呈正相关,坝砂发育处地震反射振幅明显 大于坝砂不发育处<sup>[21]</sup>(图5(a));②滩砂亚相砂泥 岩薄互层,地震反射波形特征为中一强单峰波形和 复合波波形。当厚层泥岩夹薄层砂岩时,反射特征

为半极值宽度小、幅度大、反射能量较强的中一强单 峰波形(图5(b));当双层砂岩夹薄层泥岩时,反射 特征为复波波形,中等偏下振幅,随上、下两侧砂岩 的多少而呈不对状,目振幅强处砂岩总厚度小而振 幅弱处砂岩厚度反而大<sup>[7]</sup>(图 5(c)、(d))。



Fig. 5 Sedimentary and seismic wave characteristics of beach-bar sand of  $Es_4^s$  in Wangjiagang area, Dongying Depression

#### 3.5 反演效果分析

采用约束稀疏脉冲反演和波形指示反演2种反 演方法对目的层滩坝砂岩进行预测,反演结果分别 见图6和图7。低阻值代表泥岩,高阻值代表砂岩, 约束稀疏脉冲反演和地震波形指示反演的结果整体 趋势相同,但约束稀疏脉冲反演分辨率较低,对薄层 和横向变化较快的储层预测难度较大:而地震波形 指示反演分辨率高,反演剖面中--高阻发育规律与 连井剖面上砂体发育规律基本一致,反演阻抗尖灭 点可以代表砂岩尖灭点,砂岩尖灭自然,同时可以体 现出砂岩的内部结构和沉积演化规律。地震波形指 示反演具有宽频阻抗信息,其中低频成分通过井插 值模型获得,中频成分来自地震资料的相对阻抗,而 高频成分是地震波形指示下的随机模拟结果。地震 波形是地下地质体地震响应参数的综合反映,不同 地层岩性、物性的变化都会引起反射特征的变化。 该反演方法在提高反演分辨率的同时,充分利用地 震波形的横向变化来反映储层空间的相变特征,体 现了相控思想,是一种真正的井震结合反演方法。 反演结果垂向分辨率和横向分辨率明显得到提高, 符合地质规律,反演效果好。该反演方法在沉积相 稳定且断层发育较少,测井资料丰富,地震资料信噪 比高,主频越高越好,地震波形与沉积相变有明显对 应关系的地区应用效果较好,特别适用于成熟探区

#### 和开发区块的薄层精细预测。



图6 稀疏脉冲反演波阻抗剖面







#### 3.6 沉积体系展布规律

沙四上纯下沉积时期东营湖盆处于断陷初期, 气候由干旱向潮湿转变,凹陷南斜坡相对平缓的古 地貌背景,决定了广阔的湖区以滨浅湖滩坝沉积为 主<sup>[22]</sup>。基于层序地层格架下对反演数据体提取地 层切片,从平面分布上预测砂体的展布范围和演化 规律(图8)。低位域时期湖盆面积小,沉积水体整 体较浅。准层序组1沉积期刚进入滨浅湖沉积初 期,物源主要来自东南部,物源供应不足,以滩砂沉 积为主;准层序组2沉积期水体稍有加深,之后水体 维持相对稳定,沉积物由东南向西北推进,在水下高 地处沉积滩坝砂体,坝砂非常发育,且砂体分布稳 定,由北部向南砂体厚度逐渐减薄;准层序组3沉积 期基准面持续上升,基准面上升缓慢,沉积物以加积 为主,滩砂和坝砂间互发育,滩坝砂体相对发育,砂 体分布面积增大而泥岩面积缩小,西北部远离物源 处的水下高地沉积碳酸盐岩滩坝。湖侵域时期基准 面迅速上升并相对稳定,只零星发育碳酸盐岩滩坝 和滩砂,以碳酸盐岩滩坝为主。高位域时期湖盆面 积较湖侵域变化不大,水体相对变浅。准层序组5 和准层序组6沉积期,滩坝砂呈孤立椭圆状分布,远 离物源处的水下高地沉积碳酸盐岩滩坝;准层序组 7 沉积期基准面略有下降,沉积物整体具进积特征,水下高地处沉积滩坝砂体,西北部远离物源处沉积 碳酸盐岩滩坝,碳酸盐岩滩坝分布面积较大(图9)。



图 8 东营凹陷沙四上亚段滩坝反演体切片

Fig. 8 Inversion-slice of beach bar sandstone of Es<sub>4</sub><sup>s</sup> in Wangjiagang area, Dongying Depression



图 9 东营凹陷沙四上亚段滩坝沉积微相

Fig. 9 Sedimentary microfacies of beach-bar sandstone of Es4s in Wangjiagang area, Dongying Depression

### 4 结 论

(1)本文中反演方法是在层序地层格架下利用 沉积学原理,基于贝叶斯理论下的反演过程,充分利 用地震波形的横向变化反映储层空间的相变规律, 更好地体现了相控的思想,分辨率明显提高,预测结 果更符合地质规律,是一种新的井震结合反演方法。

(2)东营凹陷沙四上亚段在低位域时期准层序 组2时期以发育坝砂为主,砂体厚且横向分布稳定, 准层序组1沉积期和准层序组3沉积期以滩砂和坝 砂间互发育,砂体厚度相对较小;湖侵域和高位域时 期主要发育碳酸盐岩滩坝,砂质滩坝呈零星状分布。

#### 参考文献:

- [1] 商晓飞,侯加根,董越,等.板桥凹陷同沉积断层主控的滩坝砂体沉积机制与分布样式[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(6):32-39.
  SHANG Xiaofei, HOU Jiagen, DONG Yue, et al. Sedimentary mechanism and distribution pattern of beach-bar sandbodies mainly dominated by contemporaneous faults in Banqiao Sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(6):32-39.
- [2] 朱筱敏,信荃麟,张晋仁,等. 断陷湖盆滩坝储集体沉积特征及沉积模式[J]. 沉积学报,1994,12(2):20-28.
   ZHU Xiaomin, XIN Quanlin, ZHANG Jinren, et al. Sedimentary characteristics and models of beach-bar reservoirs in faulted down lacustrine basin[J]. Acta Sedimentologica Sinca, 1994,12(2):20-28.
- [3] 陈世悦,杨剑萍,操应长,等. 惠民凹陷西部下第三系 沙河街组两种滩坝沉积特征[J]. 煤田地质与勘探, 2000,28(3):1-4.

CHEN Shiyue, YANG Jianping, CAO Yingchang, et al. Sedimentary characteristics of two kinds of beach-bar of Oligocene Shahejie Formation in western Huimin Depression, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2000,28 (3):14.

[4] 杨勇强,邱隆伟,姜在兴,等. 陆相断陷湖盆滩坝沉积 模式:以东营凹陷古近系沙四上亚段为例[J]. 石油学 报,2011,32(3):417-423.

> YANG Yongqiang, QIU Longwei, JIANG Zaixing, et al. A depositional pattern if beach bar in continental rift lake basins: a case study on the upper part of the fourth member of Shahejie Formation in the Dongying Sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(3):417-423.

[5] 刘书会. 薄层属性分析中存在的问题及解决方法:以 东营凹陷梁 108 地区滩坝砂岩为例[J]. 油气地质与 采收率,2006,13(2):56-58. LIU Shuhui. Problems in thin-layer attribute analysis and solved methods: a case study in beach bar sandstones in Liang 108 area of Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficienfy, 2006,13(2):56-58.

 [6] 才巨宏.综合应用波形分析及地震特征反演技术预测 滩坝砂岩:以博兴洼陷梁 108 地区为例[J].油气地质 与采收率,2005,12(3):42-44.
 CAI Juhong. Comprehensive application of technology with wave form analysis and seismic characteristic inver-

sion to beach-bar sandstones prediction-taking the area of Liang108 in Boxing Subsag as an example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005,12(3):42-44.

- [7] 韩宏伟. 薄互层地震波形特征研究:以博兴洼陷沙四段滩坝砂为例[J]. 地学前缘,2009,16(3):349-355.
  HAN Hongwei. Research on the characteristics of thin-alternating-bed seismic waveform: a case study of the beach bar sandstones of Es<sub>4</sub> in Boxing Sag[J]. Earth Science Frontiers, 2009,16(3):349-355.
- [8] 黄捍东,张如伟,魏世平.地震非线性随机反演方法在 陆相薄砂岩储层预测中的应用[J].石油学报,2009, 30(3):386-390.

HUANG Handong, ZHANG Ruwei, WEI Shiping. Research on application of seismic nonlinear random inversion to reservoirs prediction in the thin sandstone of continental deposits[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(3): 386-390.

- [9] 张宏兵,杨长春.正则参数控制下的波阻抗约束反演
  [J].地球物理学报,2003,46(6):827-834.
  ZHANG Hongbing, YANG Changchun. A constrained impedance inversion method controlled by regularized
  [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003,46(6):827-834.
- [10] 张宏兵,尚作萍,杨长春,等. 波阻抗反演正则参数估 计[J]. 地球物理学报,2005,48(1):181-188.
  ZHANG Hongbing, SHANG Zuoping, YANG Changchun, et al. Estimation of regular parameters for the impedance inversion[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005,48(1):181-188.
- [11] 张广智,王丹阳,印兴耀.利用 MCMC 方法估算地震参数[J].石油地球物理勘探,2011,46(4):605-609.
  ZHANG Guangzhi, WANG Danyang, YIN Xingyao.
  Seismic parameter estimation using Markov Chain Monte Carlo Method[J]. OGP, 2011,46(4):605-609.
- [12] 朱新玲.马尔科夫链蒙特卡罗方法研究综述[J].统 计与决策,2009(21):151-153.
  ZHU Xinling. Review on the research of Markov Monte Carlo method[J]. Statistics & Decision, 2009 (21): 151-153.

· 69 ·

- [13] 袁红军.东营凹陷博兴洼陷滨浅湖相滩坝砂岩储层 预测[J].石油与天然气地质,2007,28(4):497-503.
  YUAN Hongjun. Prediction of beach bar sand reservoirs of shore-shallow lake facies in Boxing subsag of Dongying sag[J]. Oil & Gas Geology, 2007,28(4):497-503.
- [14] 郭建卿,林承焰.频谱分解及地质模型反演新方法在 滩坝砂沉积特征及发育模式研究中的应用[J].中国 石油大学学报(自然科学版),2013,37(3):37-43.
  GUO Jianqing, LIN Chengyan. Application of new method of spectrum decomposition and seismic inversion in research of beach-bar sand sedimentary characteristics and development model[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37 (3):37-43.
- [15] 商晓飞,侯加根,孙福亭,等. 砂质滩坝储集层内部结构特征及构型模式:以黄骅坳陷板桥油田古近系沙河街组为例[J].石油学报,2014,35(6):1160-1171.
  SHANG Xiaofei, HOU Jiagen, SUN Futing, et al. Architectural characteristics and sedimentary models of beach-bar sandstone reservoirs: a case study of Paleogene Shahejie Formation in Banqiao oilfield, Huanghua depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(6): 1160-1171.
- [16] 张军华,刘培金,朱博华,等.滩坝砂储层地震解释存在的问题及对策[J].石油地球物理勘探,2014,49(1):167-175.

ZHANG Junhua, LIU Peijin, ZHU Bohua, et al. Problems and countermeasures in seismic interpretation of beach bar sandstone reservoirs [J]. OGP, 2014, 49 (1):167-175.

[17] 苏永进,蒋有录,房新娜,等.博兴洼陷古近系沙四上 和沙三段油气成藏的差异性研究[J].中国石油大学 学报(自然科学版),2006,30(2):11-15.

SU Yongjin, JIANG Youlu, FANG Xinna, et al. Otherness on pool-forming in the upper  $E_2s_4$  and  $E_2s_3$  of Palaeogene in Boxing subsag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006,30(2):11-15.

[18] 田继军,姜在兴.东营凹陷沙河街组四段上亚段层序 地层特征与沉积体系演化[J].地质学报,2009,83 (6):836-846.

TIAN Jijun, JIANG Zaixing. Sequence stratigraphy characteristics and sedimentary system evolution of upper  $Es_4$  in the Dongying depression [J]. Acta Geologica Sinica, 2009,83(6):836-846.

 [19] 操应长, 王健, 刘惠民, 等. 东营凹陷南坡沙四上亚段 滩坝砂体的沉积特征及模式[J]. 中国石油大学学报 (自然科学版), 2009, 33(6):5-10.
 CAO Yingchang, WANG Jian, LIU Huimin, et al. Sed-

imentary characteristics and models of beach-bar sand-bodies in theupper part of the fourth member of Paleo-gene in the south slope of Dongying depression [J].
Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2009,33(6):5-10.

[20] 李国斌,姜在兴,陈诗望,等.利津洼陷沙四上亚段滩 坝沉积特征及控制因素分析[J].中国地质,2008,35 (5):911-921.

LI Guobin, JIANG Zaixing, CHEN Shiwang, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of beach bars in the upper submember of the fourth member of the Shahejie formation in the Lijin subasin[J]. Geology in China, 2008,35(5):911-921.

[21] 王金铎,许淑梅,于建国,等.用波形分析法预测滨浅 湖滩坝砂岩储层:以东营凹陷西部地区沙4上亚段 为例[J].地球科学——中国地质大学学报,2008,33 (5):627-634.

WANG Jinduo, XU Shumei, YU Jianguo, et al. Prediction of beach-bar sand reservoirs using waveform analysis: a case study on  $\text{Es}_4^s$  in the area of the Dongying Sag [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2008,33(5):627-634.

 [22] 杨勇强,邱隆伟,姜在兴,等.东营凹陷沙四上亚段滩 坝物源体系[J].吉林大学学报(地球科学版),2011, 41(1):46-53.

> YANG Yongqiang, QIU longwei, JIANG Zaixing, et al. Beach bar-provenance system on the upper part of fourth member of Shahejie Formation, in Dongying sag[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011,41(1):46-53.

> > (编辑 修荣荣)