

渤中 34 地区东三段薄层滩坝砂 形成主控因素及预测

秦润森, 张建民, 王西杰, 张正龙, 陈容涛

(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:黄河口凹陷渤中 34 地区东三段发育滨浅湖砂质滩坝, 由于其储层薄、埋藏深, 储层精细刻画难度大。以渤中 34 地区 B 油田为例, 分析得到东三段薄层滩坝砂发育范围受控于古地形及其相关的水动力作用。在古地形的控制之下, 不同的水动力背景下滩坝砂的发育可以进一步划分远岸坝、近岸坝、沿岸坝。其中古地形高部位发育宽缓的低洼区, 在平均低潮线与高潮线之间, 最有利于形成近岸坝是 B 油田滩坝发育的主要类型。以楔状模型为基础, 正演出东三段储层振幅值的大小与砂体厚度存在正相关性, 以此可以建立一种半定量计算模型。研究表明, 基于滩坝主控因素约束下的地质模式与地震振幅属性共同预测对薄层滩坝砂体开发具有重要的指导意义。

关键词:薄层砂; 滩坝相; 古地形; 地震振幅; 黄河口凹陷

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2017.09006

滩坝相是我国东部陆相断陷湖盆中生代至新生代发育的一种重要的沉积相带, 由于其离油源近, 储集性能好, 生储盖组合配置完善, 往往成为油气田勘探开发的重点区域^[1,2]。在黄河口凹陷渤中 34 地区, 滨浅湖砂质滩坝沉积在东三段、东二段均可见发育^[3]。根据已钻井资料表明, 东二段滩坝砂储层横向对比相对稳定且分布一定的范围, 开发潜力巨大。然而, 东三段的滩坝砂体的发育相对于东二段而言却较大不同, 其单层沉积厚度普遍较小, 且分布范围局限; 同时, 由于其埋藏深度超过 3 000 m, 地震资料总体响应较弱, 因此, 东三段砂体的精细刻画一直是开发过程中需要解决的难点。

本文以黄河口凹陷 B 油田为研究靶区, 针对

东三段滨浅湖砂质滩坝沉积, 基于砂体沉积的主控因素及正演地震模型相结合, 探索此类薄层砂体的储层预测技术, 为此类砂体的合理开发形成有力的技术支撑。

1 区域地质特征

黄河口凹陷位于渤海湾盆地渤中坳陷南部, 北部为渤南凸起, 东部为庙西凹陷, 东南部为莱北低凸起(图 1)。在新生代以来黄河口凹陷表现为断陷和坳陷叠置结构, 其构造演化具有多幕裂陷、多旋回叠加、多成因机制复合的特征, 经历了古近纪裂陷沉降阶段和新近纪、第四纪裂陷后热沉降阶段, 基本完成了一个完整的裂陷作用旋回^[4,5]。古近纪裂陷作用具有幕式渐进发展的特征, 可进一步划分为 4 个裂陷伸展期, 东营组沉积时期为最后一个裂陷伸展期。

东营组沉积时期的渐新世后期, 处于渤海湾盆地断陷湖盆发育的萎缩阶段。盆地的大部分区

收稿日期: 2017-02-27

基金项目: “十三五”国家科技重大专项“渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”(2016ZX05058001)

作者简介: 秦润森(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事油气田开发地质研究工作。E-mail: qinrs@cnooc.com.cn



图1 黄河口凹陷构造位置

Fig. 1 Geographical location map of Hunghekou Sag

域以浅湖—冲积平原沉积为主。渤中坳陷仍保持了快速沉降、充填状态,发育了很厚的湖相沉积,由老至新划分为东三段、东二段和东一段。在研究区内,东三段处于湖平面高水位时期,主要发育巨厚层深灰色泥岩夹砂岩、粉砂岩。其后,在东三段晚期,随着湖平面的逐渐下降,发育深灰色泥岩与灰白、浅灰色砂岩、粉砂岩的不等厚互层,储层厚度及砂岩含量均明显增加。

2 滩坝沉积特征

B油田位于黄河口凹陷南部区域,油田范围东三段沉积时离南部物源较远,东三段以滨浅湖泥质沉积为主,主要为滨浅湖泥滩和混合滩沉积微相,发育少量滨浅湖砂岩,为滨浅湖砂质滩坝沉积微相。滨浅湖砂质滩坝是在湖浪的改造下,形成的富砂沉积体。根据岩心观察结果(图2),岩

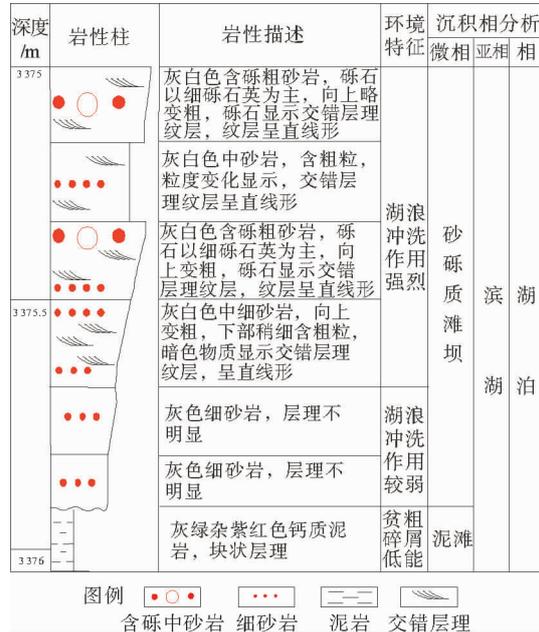


图2 1井滨浅湖砂质滩坝沉积序列

Fig. 2 Sedimentary succession of the sand bar in Well 1

性上滨浅湖砂质滩坝由含砾粗砂岩、含砾中砂岩、含砾细砂岩及中、细砂岩组成,发育低角度交错层理,纹层由定向排列的砾石或暗色组份显示,纹层平直,以低角度相交。由于滨浅湖砂质滩坝的碎屑改造历史较长,不稳定组分减少,造成砂岩骨架颗粒的石英含量明显增高^[6],孔隙类型以粒间孔为主,孔隙连通性好,岩心分析孔隙度14%~23.6%。

从已钻井对比剖面分析(图3),工区范围内东三段滩坝砂体储层厚度较薄,发育厚度普遍分

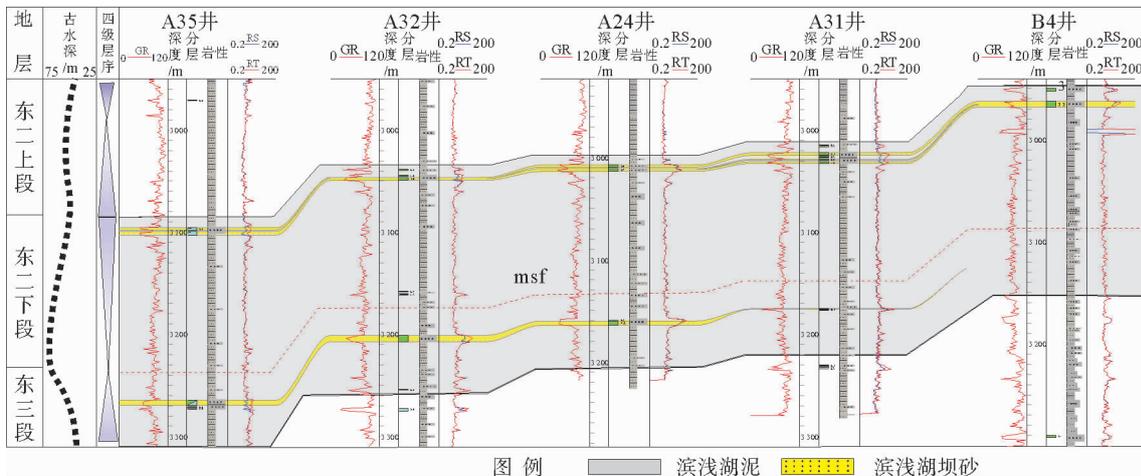


图3 渤中B油田东三段储层对比剖面

Fig. 3 The reservoir correlation of Member D3 in B Oilfield

布在 2~6 m,而且横向变化较大,如 A32 井钻遇储层 6.2 m,A31 井仅有 0.5 m。从区域地质特征分析可以得到,研究工区沉积处于湖盆中心部位,可容空间较大,物源供给较小是导致砂体发育相对局限的主要原因。

3 东三段滩坝沉积的主控因素

滩坝相的沉积模式一直是油气田勘探开发研究的热点。国内外学者通过现代滩坝沉积特征的研究认为^[7,8],地形特征与水动力条件对滩坝形成均有一定的控制作用。根据滩坝发育位置及水动力条件可以进一步划分为远岸坝、近岸坝、沿岸坝 3 种类型(图 4)。远岸坝沉积于平均低潮线与浪基面之间,此带内波浪变形强烈,对湖底的冲刷及对碎屑物质的簸选、淘洗强烈,常形成较粗粒滩坝,常以中砂沉积为主。该带内坝体虽然物性好,但经过波浪作用的反复冲刷且受地层倾角限制,沉积厚度总体相对较小。近岸坝沉积位于平均高潮线与平均低潮线之间,该带波浪进一步向岸方向传播,波峰发生完全倒转和破碎,称为“碎浪”或“涌浪”。该带内地形宽缓,砂体更容易保存,厚度相对较大,岩性以细砂为主。而当碎浪或涌浪进入滨岸带后,湖水借惯性力冲向岸边,形成“冲浪”,称为“冲浪带”或“冲浪带”,它包括惯性力作用下的进浪和重力作用下减速回返湖中的退浪或回流,此时形成沿岸坝。由于波浪能量进一步变弱,沿岸坝沉积的厚度相对较薄,岩性主要以泥质粉砂为主,局部可能含有砾石。

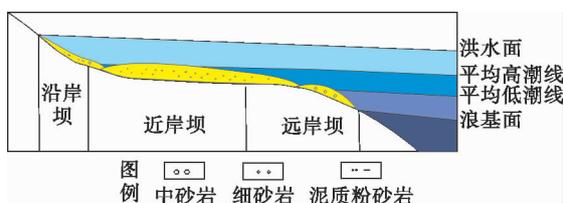


图 4 东三段不同沉积背景滩坝相成因模式
Fig. 4 The distribution pattern of sandy bars

基于古地形特征与古水动力条件,可以对区域内不同沉积环境的滩坝发育特征进行定性预测,关键是要确定划分不同水动力环境范围。本文研究的总体思路为:通过对东三段滩坝相发育

时期的古地形重建,并结合单井钻遇的储层特征可以建立不同坝体的识别标志,从而根据古地形与水动力条件圈定不同滩坝砂可能发育的范围,在区域上对滩坝发育特征进行总体评价。

在研究过程中,利用地层回剥法与古水深校正得到东三段沉积时期古地形图(图 5)。分析发现,东三段处在东营组最后一个裂陷伸展期的早期,湖盆边缘参差不齐,地势高差较大,容易形成部分湖岸线向陆方向凹的湖湾。利用单井沉积特征与古地形相接合,进一步总结东三段远岸坝、近岸坝、沿岸坝 3 种类型识别模板(表 1)。从表 1 中看出,东三段沉积的滩坝的 3 种类型主要通过井点所处的地层倾角、岩性特征、沉积厚度大小、物性差异等进行综合识别,如近岸坝沉积厚度一般在 4~8 m,地层倾角相对较缓,岩性主要以细砂岩沉积为主,电性特征上表现为明显的“漏斗型”。这与另处 2 种类型还有明显差异。

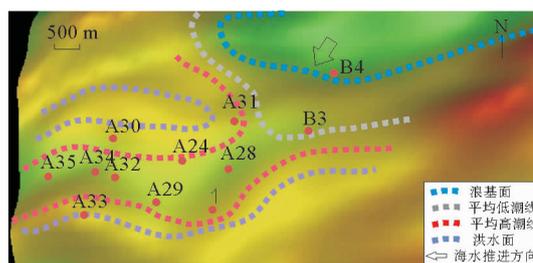


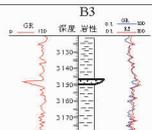
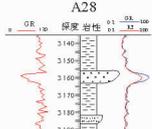
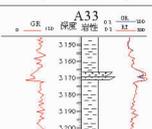
图 5 B 油田东三段沉积时期古地形及水动力条件分布
Fig. 5 The spatial hydrodynamic distribution of Member D3 of B Oilfield

水动力边界的精细刻画一直是研究的难点。水深是一个相对变化面,而不同水动力边界也许也没有严格界定的边界。因此,在研究过程中需要考虑单井本身相序所揭示的相对动力边界,结合古地形进行共同定性约束。以沿岸坝为例,通过 A33、A30、A31 井所处在古地形等值线来近似作为洪水面与平均高潮线的分布区间。以此类推,近岸坝的以 A32、A28、A34 等井所处在古地形位置来界定平均高潮线与平均低潮的分布区域。最终在古地形图上绘制不同能量的水带分布(图 5)。

从图 5 分析可以得到,对于 B 油田整体而言,构造高部位之中发育宽缓的低洼区,在平均低潮线与高潮线之间,最有利于形成近岸坝,也是东三段滩坝发育的主要类型,如 A28 井区域。而向构造高、低部位延伸,随着水动力条件的变化,

表1 B油田东三段不同成因滩坝类型及沉积特征

Table 1 The depositional characteristics of sandy bars of different genetic types in B Oilfield

成因类型	沉积背景				沉积特征		
	水动力环境	水带分布	相对水深/m	地层倾角/(°)	岩性剖面(典型井)	厚度分布/m	储层物性
远岸坝	浪基面 平均低潮线	破浪带	18~40	1~2		2~5	较好—好
近岸坝	平均低潮线 平均高潮线	碎浪带	10~18	0~1		4~8	好
沿岸坝	平均高潮线 洪水面	冲浪带	0~10	1~3		1~2	差—较好

逐渐转变为沿岸坝(B3区域)、远岸坝的沉积类型(A33区域等),以此也为后续井的实施指明方向。

4 东三段砂质滩坝砂体的定量预测

利用物探的手段是预测东三段滩坝砂体发育的另一手段。东三段砂质滩坝预测难点在于,砂体埋藏深度为2 900~3 200 m之间,且井上钻遇的储层厚度为2~6 m,在地震剖面上表现为中—弱振幅的连续反射特征,地震的分辨率已远远超过储层发育的尺度。根据薄层的地震响应特征去计算储层厚度一直是地球物理研究的热点^[9-12],李国发等^[13]通过设计薄互层地层实验论证振幅切片能够定性地反映砂体累计厚度的变化情况,且反射振幅与累计厚度成正相关关系。因此,通过反射振幅属性的强弱来分析储层发育是另一种有效途径。

由于工区内钻井较少,且坝体的厚度发育相对集中,通过已钻井结果直接回归振幅与厚度的关系式不具备代表性。另一方面,工区范围内滩坝砂体上下均发育较厚的泥岩段,薄层砂岩的地震响应特征主要取决于其本身的地质属性,地震剖面中反映出中—弱振幅的连续反射特征代表地质信息需要进一步分析。为此,通过建立东三段深埋藏条件下薄层砂体地质模型(砂厚 $<1/4\lambda$)开展正演研究。

研究过程中采用楔形模型(图6),砂体厚度为0~10 m,采用90°相位的雷克子波,主频为20 Hz, $V_{\text{sand}}=3\ 800\text{ m/s}$, $V_{\text{sh}}=3\ 400\text{ m/s}$,砂岩密度为2.36 g/cm³,泥岩密度为2.17 g/cm³,计算得到砂泥岩反射系数为0.01,以及砂泥岩各自双程旅行时。

从正演模型研究中可以得到,当砂厚 $<1/4\lambda$ 时,反射振幅关于楔形地层对称,地层能够包含在地震反射波谷中,可以通过计算波谷振幅来反映砂体振幅值大小。从东三段模型所得到的理论结果如图5所示,砂体厚度与振幅值的大小存在一定的正相关性,满足公式(1):

$$y = -0.009x^2 + 0.1957x - 0.1705 \quad (1)$$

式中: y 为振幅值;

x 为储层厚度,m。

公式(1)是从东三段地质模型正演得到振幅属性与砂层厚度的关系,从图6已钻井的匹配程度分析,4口井的匹配关系较好,A28、A30的振幅分析与厚度的相关与理论关系仍存在一定的差异,原因可能是地震资料本身的限制,同时A30井较断层较近,其振幅值也可能受断层的影响。总体而言,通过正演得到的预测模型具备一定的现实意义,对于确定滩坝的发育范围具有指示作用(图7),但以此作为厚度的预测目前仍处于半定量的范畴。

通过古地形和水动力结合的方法与地震属性

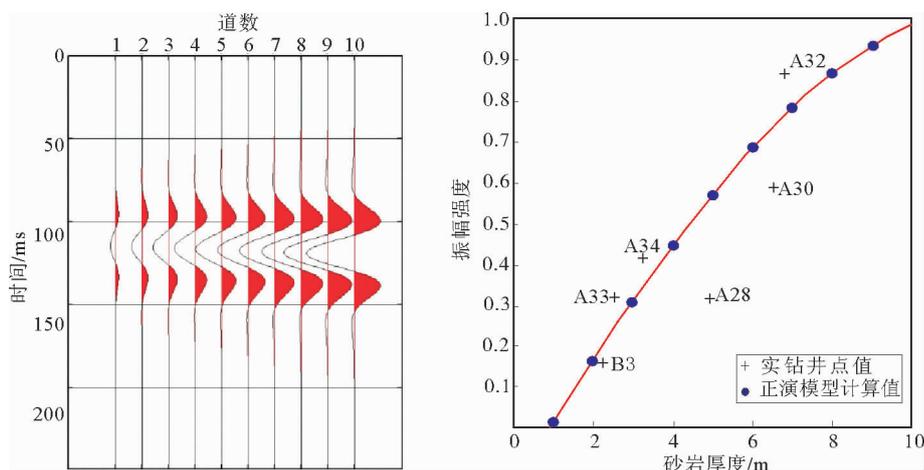


图 6 B 油田东三段基于地震振幅定量正演的砂岩厚度与振幅的定量模式

Fig. 6 The relationship between seismic wave amplitude and thickness of sandbody from seismic forward modeling for Member D3 of B Oilfield

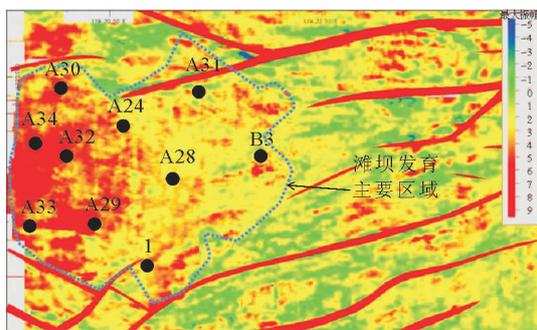


图 7 B 油田东三段砂岩最小振幅属性分布

Fig. 7 The minimum amplitude attribute of sandbody in member D3 of B Oilfield

的方法预测东二段储层的发育特征各有优劣。在研究过程中,往往采用从地震振幅属性预测加以地质认识约束的方式对滩坝砂发育特征进行分析,达到精细描述的目的。通过地震属性对滩坝的厚度进行预测,如果厚度与古动力条件与古地形的定性分析的结果接近,认为地震属性的方法是可靠的。反之,分析是否受其他因素影响,储层预测主要以地质的定性预测为主。

从 B 油田后续实施的 3 口开发井分析可以得到(表 2),振幅大小预测数据如果符合地质认识,则其预测误差较小,如 A29 预测误差在 10%

表 2 B 油田东三段滩坝相储层预测及误差分析

Table 2 Thickness prediction and accuracy analysis for member D3 of B Oilfield

井号	物探		地质		实钻/m	误差/%
	振幅值	预测厚度/m	成因类型	预测厚度/m		
A24	0.194 7	3.0	近岸坝	4~8	4.7	0.36
A29	0.681 0	5.9	近岸坝	4~8	6.5	0.09
A31	0.402 9	3.8	沿岸坝	1~2	1.9	-1.00

以内。相反,则误差相对较大(A24、A31)。但总体而言,通过地质与物探手段相结合的预测技术能够满足实际开发对储层预测的需求,从而为该区域的滩坝砂体的高效开发提供有力的支撑。

5 结论

(1)东三段滩坝相发育受控于古地形与水动

力条件。从古地形恢复出发,结合单井的特征,建立了不同滩坝成因类型的判别标准,从而对东三段滩坝发育特征相进行定性的描述。

(2)以楔形模型为基础,正演了东三段薄层滩坝砂地震响应特征。研究表明,振幅值的大小与砂体厚度存在一定的正相关性,但仍处于半定量的预测范畴。

(3)采用从地震振幅属性预测加以地质认识

约束的方式对滩坝砂发育特征进行分析,可以提高东三段薄层滩坝砂地震预测的精度,并取得较好的效果。

参考文献:

- [1] 李国斌,姜在兴,王升兰,等.薄互层滩坝砂体的定量预测——以东营凹陷古近系沙四上亚段(Es₄^上)为例[J].中国地质,2010,37(6):1559-1711.
- [2] 王永诗,刘惠民,高永进,等.断陷湖盆滩坝砂体成因与成藏:以东营凹陷沙四上亚段为例[J].地学前缘,2012,19(1):100-107.
- [3] 傅强,付晓伟,夏庆龙,等.黄河口凹陷古近系东营组沉积层序格架与油气聚集[J].中国海上油气,2010,22(5):290-296.
- [4] 王根照,胡望水.黄河口凹陷北半环的构造样式及构造演化[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2008,30(3):166-169.
- [5] 蔡东升,罗毓晖,武文来,等.渤海浅层构造变形特征、成因机理与渤中坳陷及其周围油气富集的关系[J].中国海上油气(地质),2001,15(1):35-43.
- [6] 李建平,辛仁臣,向淑敏,等.渤海湾盆地黄河口凹陷古近系东营组三段沉积特征[J].古地理学报,2008,10(4):363-371.
- [7] 朱筱敏,信荃麟,张晋仁.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.
- [8] 王升兰,姜在兴,刘晖.博兴洼陷风暴-滩坝沉积特征及模式[J].断块油气田,2009,16(4):37-40.
- [9] 凌云研究组.应用振幅的调谐作用探测地层厚度小于1/4波长地质目标[J].石油地球物理勘探,2003,38(3):268-274.
- [10] 汪恩华,贺振华,李庆忠.薄储层厚度计算新方法探索[J].物探化探计算技术,2001,23(1):22-25.
- [11] 王开燕,徐清彦,张桂芳,等.地震属性分析技术综述[J].地球物理学进展,2013,28(2):815-823.
- [12] Bahorich M, Motsch A, Laughlin K. Amplitude responses image reservoir[J]. Harts E & P, 2001, 23(1): 59-62.
- [13] 李国发,岳英,熊金良,等.基于三维模型的薄互层振幅属性实验研究[J].石油地球物理勘探,2011,46(1):115-124.

CONTROLLING FACTORS ON DISTRIBUTION PATTERN OF SANDY BARS IN MEMBER D3 OF BZ34 AREA AND THEIR QUANTITATIVE PREDICTION

QIN Runsen, ZHANG Jianmin, WANG Xijie, ZHANG Zhenglong, CHEN Rongtao
(Bohai Oilfield Institute, Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: Sandy bars are well developed in the near-shore area of the Huanghekou Sag for the Member D3 of BZ34 area. It is hard to get detailed description data of the reservoirs for their thin thickness and large burial depth. Through the study of the B Oilfield of BZ34 area, it is revealed that the development of thin sandy bars mainly depends upon the paleotopographic and paleo-hydrodynamic regimes. The sandy bar can usually be divided into three main types: far shore sandy bar, nearshore sandy bar and alongshore sandy bar, and the Member D3 of BZ34 area is dominated by the nearshore type between the average low tide and high tide lines. Upon the wedge-shape model, a positive linear correlation is found between the seismic wave amplitude value and the thickness of the sand bars. As the result, thickness can be semi-quantitatively predicted. The results from seismic wave amplitude is similar with those from paleotopographic study, and the two approaches could supplement each other in quantitative prediction of thicker sandy bars.

Key words: thick sand; sandy bar; paleotopography; seismic wave amplitude; Huanghekou Sag