

海上油田开发早期储层 构型研究及应用

——以渤中 A 油田 X 沉积体为例

周连德,田晓平,陈国成,郭 诚,秦润森,崔龙涛,李 扬

(中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院,天津 300452)

摘 要:渤海新近纪浅水三角洲沉积储层纵横向变化快、隔夹层发育,在少井条件下如何开展储层展布研究及水平井部署是海上油田开发早期亟待解决的问题。以渤中 A 油田浅水三角洲相 X 沉积体为例,据岩心、测井、地震等资料分析储层沉积特征,在高分辨率层序地层学指导下细分成因单元,分析单砂体对应测井、地震波形特征并刻画其展布。研究区储层类型以叠置分流河道、河口坝及河道间沉积为主,结合高分辨率地层学将目的层划分为 1 个短期旋回、4 个超短期旋回,反映了一套基准面逐渐下降至暴露环境,后基准面上升至再次湖泛的过程。根据储层沉积特征、地震响应特征和复合砂体精细构型研究,识别出复合砂体的 3 种接触关系,同时对 X 沉积体进行了单河道识别和隔夹层分布规律研究,将 X 沉积体细分为 3 期单元砂体,并总结出 3 种储层结构类型,结合已有水平井的生产动态特征,提出 X 沉积体水平井部署的 4 种开发模式,有效指导了开发井实施。

关键词:海上油田;层序地层学;储层构型;水平井部署

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.11005

渤海海域新近纪发育一套河流—浅水三角洲相成因储层,探明石油地质储量占渤海油田总探明石油地质储量的 56.3%,是渤海油田增储上产的主力层位之一^[1]。河流—浅水三角洲相储层纵横向变化快,隔夹层发育,油水关系复杂^[2],加之海上油田开发投资大、风险高,如何在海上少井(一般井距 350~400 m)条件下认识储层纵横向展布规律、砂体连通模式及水平井部署策略是油田开发早期亟待解决的问题。目前针对储层构型研究大多是在野外露头、现代沉积资料和测井资料条件下,往往是基于 50 m 左右的小井距条件^[3-9],而针对海上大井距条件下河流—浅水三角

洲相储层精细解剖的报道较少^[10]。

本文以渤中 A 油田浅水三角洲相 X 沉积体为例,根据岩心、测井、地震等资料研究储层沉积模式,在模式指导下建立测井、地震相与砂体叠置关系图版,刻画储层成因单元的展布特征,并在高分辨率层序地层学指导下细分单期河道,并研究基准面变化对储层叠置样式的控制作用。通过储层隔夹层分布规律及水平井生产特征分析,制定水平开发井的布井策略,为该油田开发井高效实施、注采井网优化提供了指导。

1 工区概况及沉积特征

渤中 A 油田位于渤海南部海域,黄河口凹陷的中央构造脊。渤中 A 构造即是伴随郯庐断裂

收稿日期:2016-06-28

作者简介:周连德(1982—),男,硕士,工程师,主要从事油田开发地质研究、储层预测与评价工作。E-mail:zhould@cnooc.com.cn

强烈的右旋张扭活动而形成,为一继承性发育并被断层复杂化的断块圈闭,受南北两组掉向相反的北东向正断层控制,各层圈闭形态基本一致,区域石油地质位置十分有利(图 1)。渤中 A 油田明

化镇组下段 DST 测试获得 $150 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产油流,是该地区石油开发重要层位,同时渤中 A 油田也是黄河口凹陷重要的产量接替区,为实现渤海油田“十三五”产量规划目标起着举足轻重的作用。

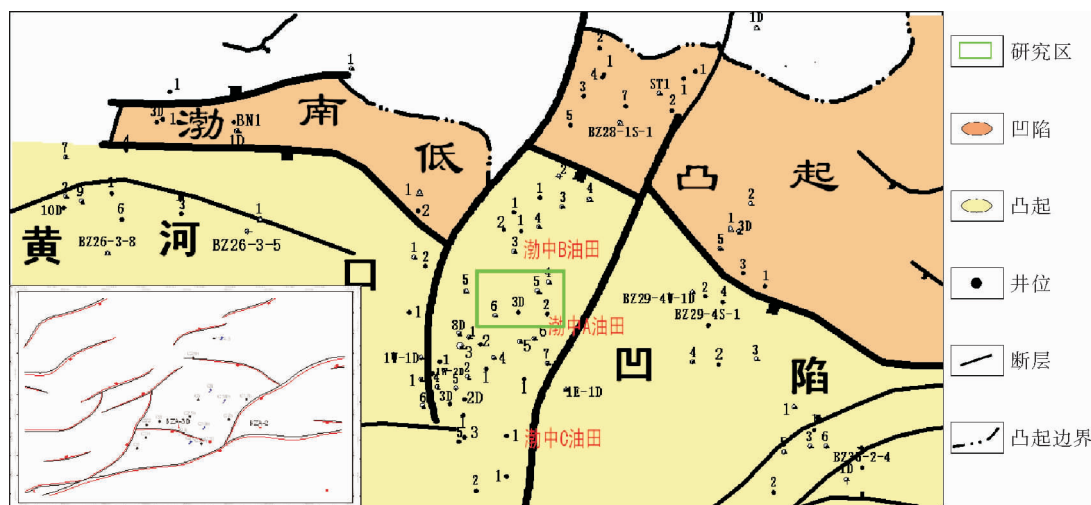


图 1 渤中 A 油田构造位置图

Fig. 1 Structural map of Bozhong A Oilfield

渤中 A 油田明下段 X 沉积体是该油田的主力砂体,长宽约 3 km,最厚处近 25 m。前人研究认为该沉积体主要以浅水三角洲沉积为主,其中物源来自 NE 方向。平面上是河流相沉积向前伸入水下湖相的延伸,是在极浅水条件下形成的,主要发育沉积微相:水下分流河道、河口坝、分流河道间(图 2)。通过岩心、测井观察,分析研究区内浅水三角洲发育特征,X 沉积体为多期单河道叠置的复合砂体,测井响应特征见图 3。

(1)叠置型分流河道 砂厚一般 10~25 m,为多期河道相互叠置切割。岩性一般以细砂岩为主,为灰色、灰白色细砂岩、粉砂岩组成的正旋回韵律层,底部具明显冲刷面。自然伽玛曲线呈齿化箱形曲线及钟形—箱形组合曲线。

复合河道纵向上呈多个正韵律特征,并且存在沉积间歇面,测井曲线主要表现为台阶变化或泥质响应特征,总结有以下 2 种识别标志(图 3): ①泥质夹层。多期河道叠加中泥质夹层代表了一期河道沉积结束到下期河道沉积开始之间短暂的细粒物质沉积。这种泥质夹层是识别两期河流沉积的重要标志。②电测曲线台阶变化。河道多期

冲刷充填,在粒径、分选性、储层物性上的差别,反映在微电极和深、浅侧向曲线出现一个台阶,这种台阶的接触面可认为是分流河道间。

(2)分流河道间 主要以泥岩为主,局部夹薄层粉砂岩,偶见水平层理。

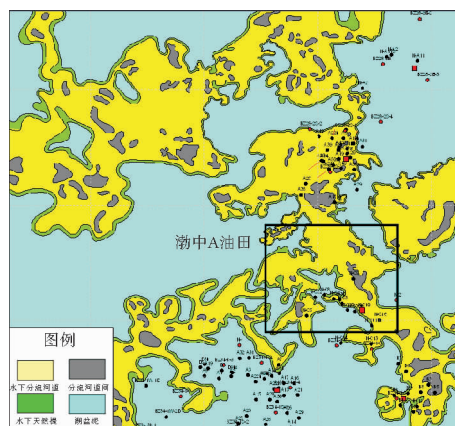


图 2 渤中 A 油田区域沉积相

Fig. 2 The regional sedimentary facies map of Bozhong A Oilfield

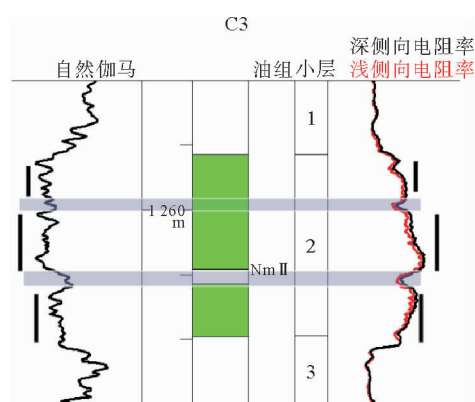


图3 复合河道测井响应特征

Fig. 3 The log response to a complex sand-body

(3)河口坝 为向上变粗的反旋回,较少见,发育于基准面下降期间。砂体厚度 1~5 m,岩性较细,主要为粉砂岩、泥质粉砂岩,岩屑成分复杂。自然电位和自然伽玛曲线呈漏斗形。

2 储层精细构型研究

基于成因单元储层构型精细研究,是通过建立测井与地震响应的对应关系,在沉积模式指导下,利用地震资料进行追踪复合沉积体^[11]。受地震分辨率影响,利用地震相刻画的河道边界存在不确定性,需借助测井资料对地震相刻画的结果进行修正。

2.1 基于高分辨率层序约束的单砂体划分

目标砂体内部储层结构比较复杂,为多条河道侧向迁移形成大面积分布的复合砂体,纵向上不同期次的分流河道相互叠置,因此,需要在高分辨率层序地层学指导下对复合砂体进一步精细划分,并依据测井相和地震波形形态,把相互叠置的厚砂层细分至单砂体级别。

X 砂体顶部泥岩稳定发育,为该时期一次较大湖泛,作为顶部标志层拉平。结合岩心、测井、地震资料,根据高分辨率地层学理论,将研究层位划分了 1 个短期旋回 C1(图 4),并进一步划分出 4 个超短期旋回(自下而上依次命名为 C11、C12、C13、C14),反映了由最大湖泛(C11 底)开始的一套基准面逐渐下降至暴露剥蚀环境(C12 底),而后基准面上升(C13),再次湖泛的过程(C14 顶)。

X 沉积体主要位于基准面下降至上升的转换面附近,可容纳空间比较小,河道砂体常互相切割叠置,发育较厚层砂(5~20 m)。通过高分辨率层序地层精细解释发现,X 沉积体可精细划分为 3 期砂体沉积,分别对应于 C12、C13、C14 旋回。其中 C12 旋回时期研究区以浅水三角洲前缘为主,发育席状砂、小型河口坝为主,随基准面下降,席状砂变厚,地层厚度产生“薄—厚—薄”的趋势,其中浅水三角洲前缘的厚度较大。C13 旋回时期基准面初始上升,沉积供给充足,充填大套厚层河道砂体,物性较好,纵横向连通性好,发育部分泥

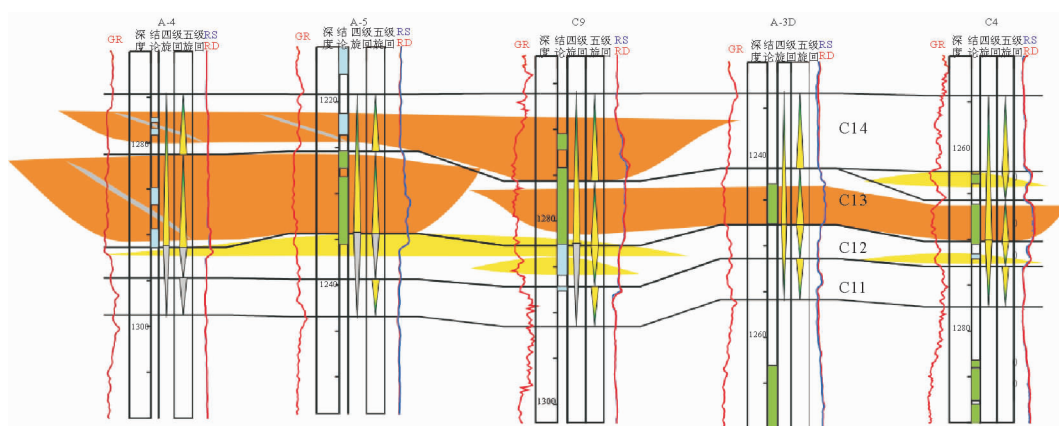


图4 X 沉积体高分辨率层序地层划分

Fig. 4 The sequence stratigraphy of the sand X

质侧积层,是最优质储层。C14 旋回时期接近湖泛,可容空间较大,物源供给减少,泥质夹层发育变多,粒度偏细,物性变差。

2.2 单砂体追踪描述

根据沉积相发育特征,结合砂体测井、地震反射特征对应关系建立 X 沉积体接触关系模式图(图 5)。其中 X 沉积体的接触关系主要发育有 3 种:①分离式复合河道。为同时期发育的 2 条复合河道,河道横向距离远,边界清晰,不叠置。在

沉积时期两期河道互不影响,中间发育河道间沉积。②叠置、切割接触式复合河道。不同时期沉积的两条河道,纵、横向均存在叠置现象,后期的河道冲刷、切割了早期部分河道,无河道间沉积。③连接式复合河道。同时期沉积的多条河道,河道横向距离较近,边界清晰,不叠置。在沉积时期多期河道互不影响,河道间沉积基本不发育。

在单河道纵向精细划分基础上,分析该油田多口井的地震波形与砂体对应关系,预测砂体叠置关系、夹层发育位置等特征。

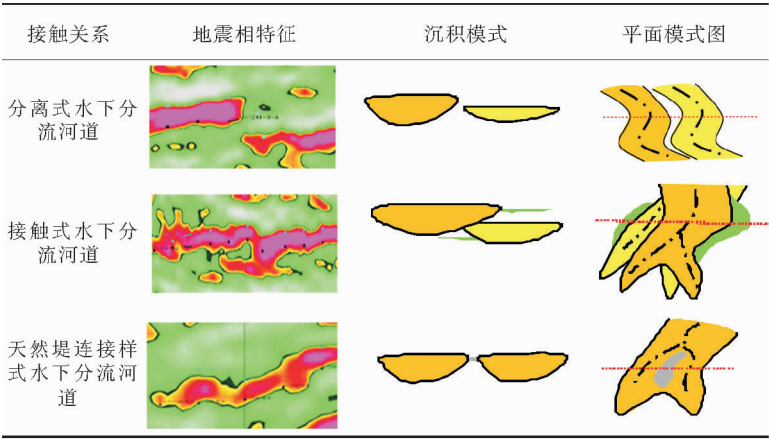


图 5 X 沉积体不同接触关系模式
Fig. 5 The diverse contact relations of the sand X

正演实验证明,单砂体的叠置特征与其对应的地震响应特征可分为 2 种类型:①当存在单期砂体时,对应地震波形呈简单对称;②当发育两期

单砂体叠置时,对应的地震波形为复波或者波形呈不对称形态,频率降低,平面上通常反映为低频分布区(图 6)。

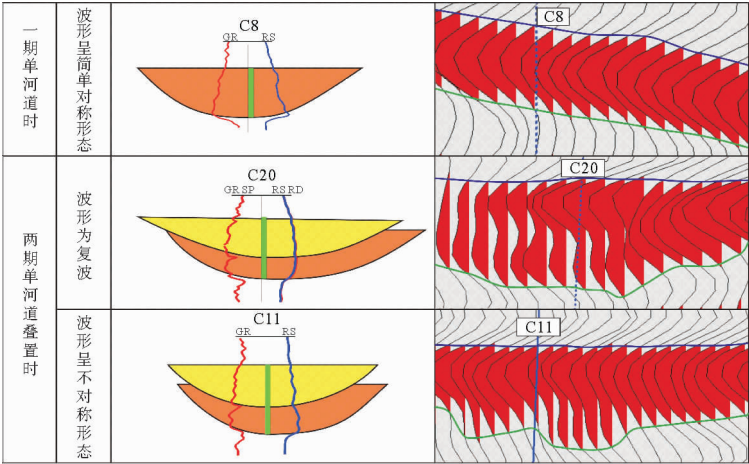


图 6 砂体叠置特征与地震反射波形
Fig. 6 Superimposed sand-bodies and their seismic reflection

X 沉积体复合河道纵向上共识别出Ⅲ期单河道,井上多钻遇其中两期单河道,依据不同砂体类型在地震波形上的响应特征,结合垂向高分辨率层序的划分,追踪单砂体的平面展布,最终刻画出 X 沉积体多期次的平面展布图(图 7)。第Ⅰ期物源主要从北部供给,水下分流河道发育,部分发育河口坝为。Ⅱ、Ⅲ期河道物源分别从东北部、北部供给。水下分流河道平面上侧向迁移,纵向上相互叠置,砂体分布范围大。

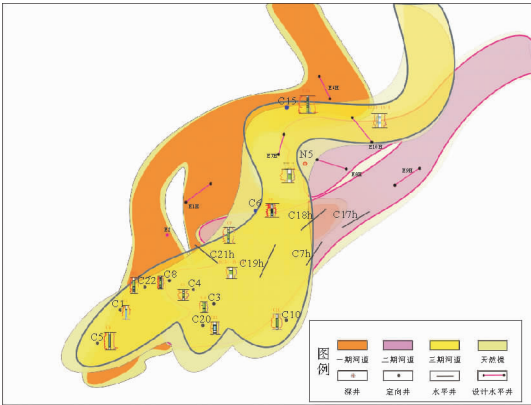


图 7 X 砂体Ⅲ期河道叠合图

Fig. 7 Overlapping of three single-channel sand bodies in sand body X

2.3 隔夹层分布特征

根据岩心观察、薄片鉴定,渤中 A 油田主要发育泥质隔夹层:包括泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉

砂岩。一般来说,隔夹层的发育程度与河道叠加期次有关。由于渤中 A 油田 X 沉积体内多为河道叠加,按照隔夹层的厚度,出现频率来看,隔夹层较为发育,隔夹层厚度变化较大,从 2 m 至 4.4 m 不等(表 1)。

表 1 隔夹层厚度统计

Table 1 Thickness of intercalations

井名	层数	隔夹层厚度/m	油层厚度/m
C15	7	2.0	11.4
C6	15	2.0	0.8
C22	2	1.7	8.0
C8	6	2.4	8.8
C4	2	4.4	5.8
C3	2	2.4	13.0

砂体叠置连通关系总体上有 3 种:完全分隔型、部分连通型、完全连通型。对于渤中 A 油田,通过井上信息可以得出 3 期河道间的隔夹层分布较为稳定,C3、C4 井隔夹层分布稳定,3 期储层沉积特征明显;而 C12、C20 井由于河道下切,多期河道没有明显的分隔。据多期河道叠置关系可以得出,该区域属于部分连通型,不排除部分位置存在特殊情况的可能。

通过渤中 A 油田 32 口井统计结果表明,X 沉积体的隔夹层类型属于泥质隔夹层,水下分流河道侧积区、分流河道末端或间湾与多期河道水下分流河道叠置区都是隔夹层分布的有利区域(图 8)。

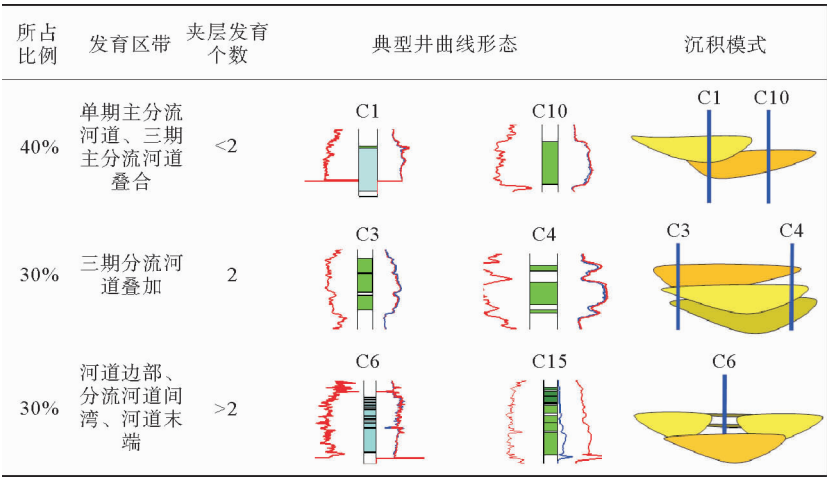


图 8 渤中 A 油田隔夹层发育模式

Fig. 8 The depositional pattern of interlayers of Bozhong A Oilfield

根据已钻遇井隔夹层厚度与有利隔夹层分布位置,对隔夹层厚度及分布初步认识:隔夹层在河道中部不甚发育,厚度较薄,在河道边部及多期河道叠置区域较为发育,且厚度较大,隔夹层厚度分布见图 9。在水平井布井实施过程中要充分考虑隔夹层的影响。

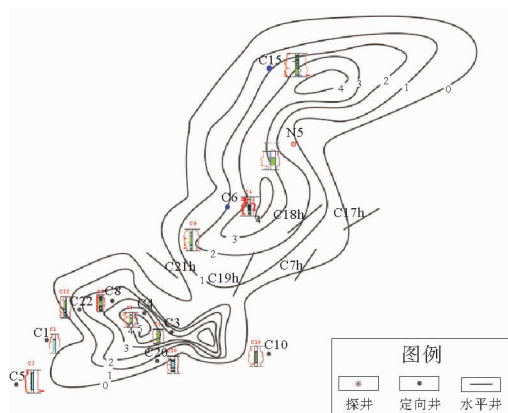


图 9 隔夹层厚度分布

Fig. 9 The isopach map of the thickness of intercalations

3 在油田开发中的应用

X 沉积体内由多套复合砂体组成,在少井条件下为区分单元,据测井、地震反射特征识别出 3 种复合砂体接触模式,以解决砂体连通性难题。研究认为,叠置、切割式复合河道是连通性较好的一类砂体,纵、横向存在叠置,连通可能性较大,然而河道叠置区隔夹层比较发育,水平井设计时应考虑隔夹层的影响。

3.1 水平井布井策略

水平井与常规生产井相比,其优势在于能够有效增加油气层波及体积,提高油气采收率及单井产量,并且可以解决致密地层、低渗透层采油产量低的问题。

渤中 A 油田即将进行综合调整方案实施,主力 X 沉积体将实施 6 口水平井,分别为 E1H、E6H、E7H、E8H、E9H、E10H,其中 E6H 和 E10H 为注水井(图 10),结合本文研究和已有钻井认识,6 口水平井目标储层结构不尽相同,大致可以分为以下 3 种:①河道边部存在隔夹层发育

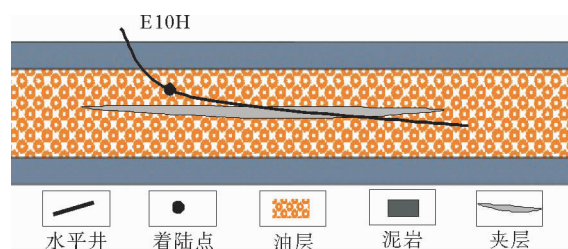


图 10 两期河道水平注水井井位设计示意图

Fig. 10 The schematic diagram showing horizontal water injection into two river channels

及储层变薄的风险,代表井为 E1H;②多期河道叠置区域隔夹层比较发育,代表井为 E6H、E10H;③单河道主体部位,储层正韵律特征明显,隔夹层影响风险较小,代表井为 E7H、E8H、E9H。

X 沉积体开发井钻后至今未进行调整,注采井网不完善。为提高储量动用程度,结合储层构型研究,对后续水平井实施策提出以下 4 类建议:①井位微调,其中 E1H 水平段应顺主河道方向,以保证顺利着陆及水平段储层钻遇率;E2 井应调整至主河道上,以规避隔夹层发育及储层变薄的风险;②注水井钻穿储层,E6H、E10H 分别位于 I、II 期、II、III 期河道叠置区域,隔夹层较发育,为保证上下两期河道注采受效,水平段应钻穿两期河道(图 11);③E7H、E8H、E9H 位于单河道上,储层稳定受隔夹层影响的风险较小,水平段应尽量位于储层顶部;④根据已钻井实钻资料,N4、N5、C15 井位于两期河道叠置处,第 3 期河道储层物性差,附近新井(E6H、E7H、E8H、E9H、E10H)应考虑储层正韵律特点靶点深度适当加深。

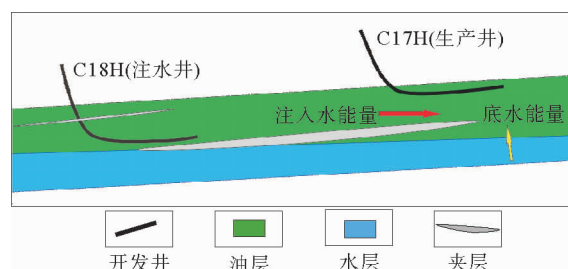


图 11 C18H、C17H 井注水效果示意图

Fig. 11 Effects of water injection in wells C18H and C17H

3.2 优化注水效果

在总结隔夹层分布特征的基础上,利用隔夹层的遮挡作用,对 C18H、C19H 注采井组开展了优化注水研究。由表 2 该油田注水效果可知,增注后采油井产液量没有明显的变化,而产油量有明显增加,含水率降低。根据动态分析可知,由于

C18H 水平段位于隔夹层上部,底水被隔夹层阻挡,未增注之前底水能量大于注入水能量,储层底部油被边水能量产出;而增注以后,注入水能量增强,并大于底水能量,从而隔夹层上部的剩余油驱替出来(图 11),水平井注水措施优化有效利用了隔夹层的发育特点。

表 2 C18H、C19H 周期注水效果
Table 2 Effect of periodic water injection in C18H and C19H

注水井 井名	周边受 效井	增注前			增注后(相对稳定时)			变化		
		日产液 /(m ³ /d)	日产油 /(m ³ /d)	含水率 /%	日产液 /(m ³ /d)	日产油 /(m ³ /d)	含水率 /%	日产液 /(m ³ /d)	日产油 /(m ³ /d)	含水率 /%
C18H	C7H	117	30	74	116	36	69	—1	6	—5
	C17H	167	47	72	163	68	58	—4	21	—14
C19H	C21H	129	108	16	153	130	15	24	22	—1

4 结论

(1)该区主要发育浅水三角洲沉积,研究对象 X 沉积体为多期单河道叠置的复合砂体,砂厚一般 10~25 m,为多期河道相互叠置切割而成,纵向上呈多个正韵律特征,泥质夹层和电测曲线台阶变化是识别复合砂体各期单河道的主要标志。

(2)结合高分辨率地层学将 X 沉积体划分为 1 个短期旋回、4 个超短期旋回,根据储层沉积特征、地震响应特征和复合砂体精细构型研究认为,X 沉积体主要存在 3 种接触关系类型:分离式复合河道、叠置一切割式复合河道、叠置式复合河道和连接式复合河道,并对 X 沉积体进行了单河道识别和隔夹层分布规律研究,将 X 沉积体细分为 3 期单元砂体,刻画 X 沉积体多期次的平面展布图及隔夹层厚度分布图。

(3)根据储层构型精细研究和隔夹层分布规律,预测优势储层及隔夹层分布区带,总结出 X 沉积体 3 种储层结构类型,提出 X 沉积体水平井部署的 4 种开发模式,有效指导了开发井实施;同时利用隔夹层发育特征优化注水,生产动态特征表明增油效果明显,为同类油田早期开发及生产管理提供了借鉴意义。

参考文献:

[1] 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.

[2] 赵翰卿,付志国,吕晓光,等.大型河流—三角洲沉积储层精细描述方法[J].石油学报,2000,21(4):109-113.

[3] 张绍臣,李臣,贾培宜,等.萨南油田南二区曲流型分流河道砂体建筑结构及剩余油挖潜[J].大庆石油学院学报,2009,33(4):27-30.

[4] 尹太举,张昌明,汤军,等.马厂油田储层层次结构分析[J].江汉石油学院学报,2001,23(4):19-21.

[5] 尹太举,张昌明,樊中海,等.地下储层建筑结构预测模型的建立[J].西安石油学院学报:自然科学版,2002,17(3):7-10,14.

[6] 卢虎胜,林承焰,程奇,等.东营凹陷永安镇油田沙二段三角洲相储层构型及剩余油分布[J].大庆石油学院学报,2013,37(3):40-47.

[7] 吴胜和,翟瑞,李宇鹏.地下储层构型表征,现状与展望[J],地学前缘,2012,19(2):15-23.

[8] 岳大力,吴胜和,刘建民.曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法[J].石油学报,2007,28(4):99-100.

[9] 张善义,兰金玉.水下分流河道建筑结构模式的建立及对剩余油的控制作用[J].油气藏评价与开发,2013,3(5):9-12.

[10] 刘超,赵春明,廖新武,等.海上油田大井距条件下曲流河储层内部构型精细解剖及应用分析[J].中国海上油气,2014,26(1):58-64.

[11] 周东红,张志军,谭辉煌.基于谱反演的超限厚储层描述技术及其在渤海海域“富砂型”极浅水三角洲储集层的应用[J],中国海上油气,2015,27(3):25-30.

FINE RESERVOIR CHARACTERIZATION AND ITS APPLICATION TO EARLY DEVELOPMENT OF AN OFFSHORE OILFIELD: A CASE STUDY FROM THE SAND BODY X OF BOZHONG A OILFIELD

ZHOU Liande, TIAN Xiaoping, CHEN Guocheng, GUO Cheng, QIN Runsen, CUI Longtao, LI Yang
(Tianjin Branch of CNOOC Ltd. Tianjin 300452, China)

Abstract: The Neogene shallow-water deltaic reservoir, which bears many intercalations, changes quickly both vertically and horizontally in the Bohai Oilfield. Predicting the reservoir distribution and optimizing the location of horizontal wells need to be solved in the early stage of development in order to reduce the well number to the minimum. The shallow-water deltaic deposit in the Bozhong A oilfield is selected as an example in this case of study. According to the data of cores, logging and seismics, the deposits are divided into several genetic units under the guidance of high resolution sequence stratigraphy. In the study area, distributary channels, mouth bars and river sediments are well developed. The depositional sequence includes 1 short-term cycles and 4 ultra-short-term cycles, reflecting a progradational sequence as the sea-level decline to exposure, and then a retrogradational sequence as the sea level rising again to the flooding surface. According to the deposition pattern and sequence characteristics, 3 kinds of contact relationship of the composite sand body are identified. Moreover, single-channel sand body and distribution of interlayers are predicted. The sand body X is separated into three upon structures. Combining with the production characteristics of horizontal wells, suggestions are made for optimization of horizontal wells under the four development modes.

Key words: offshore oilfield; high-resolution sequence stratigraphy; reservoir characterization; horizontal well development