文章编号:1673-5005(2018)06-0001-08

三角洲前缘河口坝复合体剩余油分布物理模拟

刘太勋^{1,2},李超¹,刘畅³,孙强¹

(1.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580;2.青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与 探测技术功能实验室,山东青岛 266071;3.中国石化胜利油田分公司河口采油厂,山东东营 257200)

摘要:以陆梁油田陆9 井区 K₁h₂⁷⁻⁴小层为例,遵循河口坝构型模式和增生体发育模式,对河口坝复合体内不同类型 夹层进行识别并统计坝体发育规模。根据相似准则设计河口坝复合体试验模型,开展水驱油物理模拟,分析隔夹层 对剩余油分布的影响及水驱后的剩余油分布规律。模拟结果表明:剩余油在河口坝复合体内部四级界面对应的稳 定隔层以及单一河口坝内部三级界面对应的不稳定夹层附近富集;顶部或底部具封隔能力的夹层比中部夹层更有 利于剩余油富集;夹层发育规模越大,倾角越大,阻碍流体运动能力就越强,越有利于剩余油富集;隔、夹层相交形成 的三角形区域剩余油富集。

关键词:三角洲前缘;河口坝;物理模拟;剩余油分布;陆梁油田;准噶尔盆地

中图分类号:TE 122.2 文献标志码:A

引用格式:刘太勋,李超,刘畅,等. 三角洲前缘河口坝复合体剩余油分布物理模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):1-8.

LIU Taixun, LI Chao, LIU Chang, et al. Experimental simulation of remaining oil distribution in combined debouch bar of delta front reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2018, 42(6):1-8.

Experimental simulation of remaining oil distribution in combined debouch bar of delta front reservoir

LIU Taixun^{1,2}, LI Chao¹, LIU Chang³, SUN Qiang¹

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

2. Function Laboratory of Marine Geo-Resource Evaluation and Exploration Technology,

Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;

3. Hekou Oil Production Plant, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257200, China)

Abstract: Taking the $K_1 h_2^{7-4}$ Formation of Lu9 block in Luliang Oilfield as an example, the different types of interlayers in the combined debouch bar were identified. The scale of bar was measured according to the debouch bar architecture model and the inner accretion layering model. The experimental model of the combined debouch bar was designed according to similarity criterion, and physical simulations of water flooding were carried out. The influence of the interlayer on the remaining oil distribution and the remaining oil distribution after water flooding were analyzed. The simulation results show that: the remaining oil is enriched near the stable interlayer corresponding to the forth level interface within the combined debouch bar, and near the unstable interlayer corresponding to the third level interface within the single debouch bar. These interlayers with a top or bottom sealing capacity are more favorable for the remaining oil enrichment relative to the central interlayer with a certain sealing capacity. Interlayers with larger scale and greater inclination angle usually lead to stronger obstruction of the fluid movement, resulting in more remaining oil enrichment. The triangular region formed by the intersection of the interlayers is more favorable for the enrichment of remaining oil.

收稿日期:2018-04-10

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41772138);国家自然科学基金青年基金项目(41202090);中央高校基本科研业务费专项 (14CX02097A)

作者简介:刘太勋(1977-),男,副教授,博士,研究方向为油气田开发地质。E-mail:liutaixun@126.com。

Keywords: delta front; debouch bar; physical simulation; remaining oil distribution; Luliang Oilfield; Juggar Basin

剩余油分布预测及提高采收率是当今世界各石 油生产国普遍关注的问题^[14],开展储层构型研究为 剩余油分布规律提供了有效手段^[54]。近年来,国内 外学者对三角洲储层研究逐渐深入,针对三角洲前 缘水下分流河道内部构型做出了许多具有标志性意 义的研究工作^[9-13],但对河口坝内部构型及其控制 下的剩余油分布物理模拟研究还不够深入^[14-15]。 笔者以陆梁油田陆9井区白垩系呼图壁河组上段7 砂组4小层(K₁h₂⁷⁻⁴)河口坝为例,在对三角洲储层 构型解剖的基础上,依据河口坝构型模式及河口坝 增生体发育模式,以砂箱物理模拟为手段,对河口坝

1 研究区概况

陆梁油田陆9井区位于新疆维吾尔自治区和丰 县境内,构造上位于准噶尔盆地陆梁隆起三个泉凸 起I号背斜的东高点^[16],为一个较大的穹窿构造。 研究区主要含油层段为呼图壁河组上段3砂组到7 砂组,其中7砂组4小层为主力含油小层,属三角洲 前缘沉积。研究区储层物性较好,为中高孔、中高渗 储层。地层原油密度为0.808 g/cm³,地层原油黏度 为4.243 mPa·s。研究区油藏2001年全面投入开 发,由于砂体内部夹层较复杂,储层物性差异大, 在注水开发过程中水驱状况和剩余油分布规律不 清楚,严重影响了油藏后续的开发。因此急需对 其储层结构进行精细解剖,并据此分析剩余油分 布规律。

2 三角洲前缘河口坝构型解剖

2.1 夹层类型及识别

岩心描述表明区内发育泥质、物性和钙质3类 夹层,夹层在测井曲线上有较好的响应。泥质夹层 岩性为泥岩或粉砂质泥岩,厚度一般小于 30 cm。 自然电位(SP)曲线回返幅度小于 1/3,自然伽马 (GR)曲线回返幅度小于1/2,声波时差(AC)较高, 微电极曲线基本无幅度差(图1(a))。泥质夹层是 静水期或一期洪水中洪峰间歇期沉积形成的,为区 内最主要的夹层类型。物性夹层岩性为泥质粉砂岩 或粉砂岩,储层物性差,SP曲线有微弱回返,GR回 返幅度小于1/3.AC曲线有较明显起伏,两条微电 极曲线幅度差较小(图1(b))。物性夹层是洪峰期 洪水能量减弱形成的。钙质夹层岩性为钙质粉砂岩 或含钙泥质粉砂岩,SP曲线无明显变化,GR曲线微 弱回返,AC曲线具低值尖峰,微电极曲线具明显高 值尖峰(图1(c))。钙质夹层是后期钙质胶结作用 形成的,这类夹层分布范围局限。





2.2 河口坝构型特征

利用层次分析法对河口坝构型解剖表明 K₁h₂⁷⁻⁴小层平面上发育5个复合河口坝(图2),从 左到右依次为1~5号,中部3号和4号坝体规模较 大。剖面构型解剖表明:K₁h₂⁷⁻⁴小层3~4号坝体间 发育3期进积式河口坝砂体(图3),其中五级和四 级界面均为渗流屏障,三级界面中夹层发育位置为 渗流屏障,其他位置不具有阻碍流体运动的能力。第 一期河口坝规模较小,内部可识别出2个三级界面, 界面倾角为3.3°。第二期河口坝规模较大,内部可识 别出3个三级界面,对应夹层发育规模约为三级界面 规模的一半,发育在坝中心部位,夹层倾角为3.1°。 第三期河口坝内部可识别出3个三级界面,发育在坝 前缘,夹层倾角为2.3°。总体看来,单一河口坝内部 包含多个增生体,增生体厚度约为2m。

对 5 个复合河口坝的规模进行统计,其长度为 1 326~3543 m,宽度为 691~2662 m,平均长宽比 为 1.09~1.96。3 号和 4 号复合河口坝砂体发育 规模最大,砂体最厚,粒度最粗,渗透性也最好(表 1)。根据河口坝发育的不同期次,对单一河口坝规 模进行统计(表 2),单一河口坝厚度平均为 3.8 m, 坝长平均为 1 346 m,坝宽平均为 749 m,长宽比约为 1.8,长厚比约为354.21。三期河口坝砂体均为反 韵律,渗透率由下向上依次变大,渗透率最高的部位 为第一期和第二期河口坝的顶部粗砂体。第一期河 口坝砂体由下向上由中砂渐变为粗砂,第二期河口 坝砂体由下向上由细砂渐变为粗砂,第三期河口坝 砂体由下向上由细砂渐变为中砂。

0	1 km	2			3		4		
		L2110 L212	27	L1021	L2091 L21	L7132	2	L7172	5
	1 L2223	L3001 L300	4 L1015	L1022 L1200 L1030 L	L1092 L1 9 L21	1112 L8132 14 L2133	L21	60 L9	193
	L1180	L1012 L1	034 L10:	L2074	L9104 L21 L8104 L	15 L2134	L9164	L2174	L9204
L1200	L1191 L1001	L1014 L1	035 L10	55 L1075 L2	180 L911 L8	5 115L1125	L9155 L816	55	L/195 L/215
L1201	L1192 L1002	L1016 L1	036	L20 L1066 L108	996 L 91 16	L2136 L1116	L9156 L	9176 L40)02
L1202	L1193 L1003	L1017 L1	037 L10	57 L7078		L1076 L9147	L9157 L	9177 L91	197 L9217
L,9]	1040 L10:	L7088 1 58	L ⁷⁰⁹⁸ L21	18 L	2148	L91	.98 L9218
井位 井号	水下分 河口坝 连井音 流河道 河口坝 面线	刹	L2049	L7089	L7109	L7129	L7149 L	7179 L718	³⁹ L7209
] -m	•	L120		L110 L714	0 L7160	L7180	L7200 L7220
席状砂	小下方 前三 西口 流间湾 角洲 编号	火					L7061	L719	1 L7211



Fig. 2 Plane distribution of sedimentary microfacies in K₁h₂⁷⁻⁴ Formation



图 3 K₁h₂⁷⁻⁴小层构型界面剖面展布

Fig. 3 Profile of architecture bounding surfaces in K₁h₂⁷⁻⁴ Formation

表1 陆9井区 K₁h₂⁷⁻⁴小层复合河口坝规模统计

Table 1	Scale of different combin	ed debouch ba	urs of K ₁ h ₂ ⁷⁻⁴	⁴ Formation in Lu9	block
---------	---------------------------	---------------	---	-------------------------------	-------

复合河口坝		砂体长/m		砂体宽/m			平均
编号	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	长宽比
1号	2 0 2 4	1 3 2 6	1 601	1111	856	999	1.60
2 号	2 008	1 477	1 843	1 846	1 354	1 691	1.09
3 号	3 543	2404	2941	1 899	1 4 4 5	1731	1.70
4 号	3 2 2 1	1717	2976	2662	1 795	2 1 9 4	1.36
5 号	2768	1 384	2072	1 1 4 2	691	1 0 5 9	1.96

```
表 2 陆 9 井区 K<sub>1</sub>h<sub>2</sub><sup>7-4</sup>层不同期次单一河口坝规模统计
```

Table 2Scale of single debouch bars with differentperiod of $K_1 h_2^{7-4}$ Formation in Lu9 block

单一河口坝	坝长/	坝宽/	厚度/	匕室山	长厚比
期次	m	m	m	K 见比	
第一期	987	677	3.5	1.46	282.00
第二期	1 351	859	4.1	1.57	329. 51
第三期	1 700	713	3.7	2.38	459.46
平均值	1 346	749	3.8	1.80	354. 21

3 试验模型设计及试验方案

3.1 试验模型设计

河口坝构型解剖结果表明研究区复合河口坝上 下界面为5级构型界面^[17]。单一河口坝间的两条 隔层附近为4级构型界面。单一河口坝内部各增生 体间的夹层附近为3级界面,分割增生体的夹层往 往因发育规模有限仅具有局部隔挡能力。

根据相似准则[18],设计的试验模型体现为进积

式复合河口坝,在复合河口坝中设计出三期单一河 口坝,依次向左侧进积,三期河口坝被两条具有微小 角度的隔层分开(图4)。第一期河口坝下部填充中 砂,上部填充粗砂,厚度比约为2:1,在第一期河口 坝的上部设计一条泥质夹层作为2个增生体的分 界,泥质夹层顶部封隔。第二期河口坝自下而上依 次填充细砂、中砂和粗砂,厚度比约为1:2:1,在其 内部设计两条夹层作为3个增生体的分界,右侧夹 层仅发育在中部,左侧夹层规模稍大,在中部和上部 发育,顶部封隔。第三期河口坝下部填充细砂,上部 填充中砂,厚度比约为1:2,在下部靠河口坝前缘位 置设计一条夹层,作为2个增生体的分界,夹层下部 封隔。

K₁h₂⁷⁻⁴小层中的隔、夹层均向南倾,倾角较小, 约为3°,坝体长度平均为1346 m,坝体宽度平均为 749 m,试验模具长度和宽度分别为72 和 30 cm,考 虑到试验模具和实际坝体不在同一数量级,同时为 了突出夹层对试验效果的影响,需增大夹层的倾角, 试验中夹层倾角约为30°。



Fig. 4 Distribution of probes in experimental model of debouch bar

3.2 试验方案

(1)配制试验用油及试验用水。试验选用柴油及少量安定来润滑油混合配制出黏度、密度与实际 地层条件相似的试验用油,并向其中添加油红染色 剂以便于观察试验现象。试验用水由蒸馏水及氯化 钠配制而成,含盐量为1.5%。

(2)制作试验模型。试验的砂箱尺寸为72 cm× 30 cm×5 cm,分布60 个测量电阻(图4)。细砂选用 粒径为0.125~0.15 mm的石英砂,中砂选用粒径为 0.25~0.3 mm的石英砂,粗砂选用粒径为0.5~0.6 mm的石英砂,隔、夹层选用粒径小于0.037 mm的 石英粉。浸湿石英砂,采用湿填法以便更高效地制 作试验模型,试验所用砂粒为亲水性石英砂,三期河 口坝砂体渗透率由下到上均增大,在第一期和第二 期河口坝砂体顶部填充粗砂,这些位置也是渗透率 最大的位置。

(3)给模型饱和水。采用5 mL/min 的流速注入 配制而成的盐水,直到出液口速度恒定,电阻率基本 无变化。

(4)给模型注入油。为了模拟油气向圈闭充注的过程,旨在得到初始含油饱和度。采用2 mL/min 流速注入试验油,直到出液口没有更多的水排出,排 油速度稳定和电阻率基本无变化。

(5)水驱油试验。为了有效地观察试验过程同时考虑试验的安全性,采用1 mL/min 流速注入盐水,直到出液口没有更多的油排出,排水速度稳定和电阻率基本无变化。

试验过程中采集各测点的电阻率数据,观察试 验现象并及时拍照。通过所测得的电阻率采用 Archie 公式即可计算相应位置的含油饱和度^[19],计算 方法如下:

$$\frac{R_{o}}{R_{w}} = F = \frac{a}{\varphi^{m}},\tag{1}$$

$$I = \frac{R_{i}}{R_{o}} = \frac{b}{(1 - S_{o})^{n}}.$$
 (2)

式中 R_{o} 为孔隙中100%含水的地层电阻率, $\Omega \cdot m$; R_{w} 为孔隙中所含地层水电阻率, $\Omega \cdot m$;F为岩石的 地层因素;a为与岩性有关的比例系数; φ 为岩石孔 隙度,%;m为胶结指数;I为电阻增大系数; R_{i} 为含 油岩石电阻率, $\Omega \cdot m$;b和n为与岩性有关的两个参 数; S_{o} 为含油饱和度,%。

已知 a,m,φ 和 R_w ,通过式(1)可求出 R_o ;已知 R_t,R_o,b 和n,通过式(2)可得 S_o 。试验中由于砂箱 模型是未胶结的砂,因此计算中m取值 1.3,n取值 2,由于试验中使用的是纯净的石英砂,因此a取值 1,b取值 1.03。

4 模拟试验及剩余油分析

4.1 试验过程

根据试验方案步骤开展水驱油模拟试验,注入 油总重 3.705 kg,采出油总重 1.781 kg,采收率为 48.07%,试验采收率较油藏采收率偏高,其原因为: 砂体未得到充分压实,较地下储层孔渗性好;试验初 始状态含油饱和度高于地下油藏原始含油饱和度。 试验过程图像采集如图 5 所示,图 5(a)为初始填砂 模型,其中灰白色部分为泥质隔夹层,体现河口坝隔 夹层分布特征。图 5(b)为充注油完成状态,除了泥 质隔夹层外,基本每个位置都注入了油,油充注情况 良好。水驱油6h后模型顶部颜色变为白色,其余部 位颜色基本没有变化(图5(c)),说明主要是对顶部 的油进行驱替,且驱替较彻底。其原因为顶部砂体 粒度粗,物性较好,且没有夹层隔挡。驱替试验进行 6~12h过程中,因为第三期河口坝上部驱油较彻底 且下部有夹层隔挡,所以主要为第一期和第二期河 口坝砂体出油,表现为红色变浅(图5(d))。每一期 河口坝中均可明显观察到下部驱替效率要高于上 部,原因是重力作用和夹层对驱油效率的双重影响 大于粒度差异对驱油效率影响。对比一、二期河口 坝可知,第一期河口坝底部驱油效率更高,表明注入 水重力作用对驱替过程影响显著。驱替试验进行18 h后,模型顶部仍然只发生注入水的窜流,驱油作用 主要集中在第一期和第二期河口坝内,第一期河口 坝底部的注入水波及范围几乎贯穿整个模型,而第 二期河口坝底部注入水前缘位置已达采液端,二者 在纵向波及范围上也进一步扩大(图5(e))。水驱 油试验进行24h后,出油端含水达98%,水驱油试 验结束(图5(f)),注入水在横向及纵向波及范围进 一步扩大。对比各种类型的夹层可知,顶部和底部 封隔夹层对流体的阻碍作用优于中部封隔夹层。剩 余油主要分布在底部封隔夹层来水一侧和顶部封隔 夹层背水一侧。对比两条顶部封隔夹层可知,夹层 发育规模越大,阻碍流体运动的能力就越强,剩余油 也越多。因此剩余油主要分布在顶、底部封隔夹层 与隔层相交形成的锐三角形区域及中部封隔夹层弧 线朝向一侧,在第一、二期河口坝上部和第三期河口 坝下部的其他位置也有剩余油分布。



(e) 水驱油18h 状态

(f) 水驱油24h 状态

图 5 试验过程记录

Fig. 5 Photos of experimental processes

4.2 坝间隔层对剩余油的影响作用

为了研究坝间隔层对剩余油的影响作用,选取 11号、35号和59号探针位置含油饱和度变化来进 行分析,3个测量点分别隶属于被隔层分开的不同 期次河口坝,其砂体粒度、离注水端位置均相同。从 含油饱和度变化曲线可看出,11 号、35 号和 59 号探 针位置初始含油饱和度分别为 39%、53% 和 70%, 其原因为油水重力分异作用导致上部含油饱和度要 高于下部(图 6)。11 号和 35 号探针位置含油饱和 度初期下降缓慢,中期下降加快,且 35 号含油饱和 度加速下降的时间先于11号位置,后期含油饱和度 趋于平稳,而59号探针位置含油饱和度前期迅速下 降,驱替7h后,含油饱和度降至约4%,之后含油饱 和度趋于平稳。其原因为59号位置相对于11号和 35号位置压实程度低,没有夹层遮挡;注入水的重 力下沉作用对驱替过程有重要影响。11号、35号和 59号位置剩余油饱和度分别为4%、21%和4%。





4.3 坝内夹层对剩余油的影响作用

为了研究坝内夹层对剩余油的影响作用及三级 构型单元之间剩余油分布的差异,在同一河口坝被 夹层隔开的不同增生体内选取砂体粒度相同,离注 水端位置不同的26号、31号和35号探针位置的含 油饱和度变化进行分析(图7)。





31 号和 35 号位置初始含油饱和度基本相近, 原因是 1、2 号增生体间的中部封隔夹层倾角小,油 可以顺利注入到 31 号位置。31 号位置剩余油饱和 度略高于 35 号位置剩余油饱和度,说明该夹层具有 一定的阻碍流体运动的能力,但是其影响较小。31 号位置处含油饱和度前期有一定程度的上升,驱替 3.5 h 后含油饱和度开始逐渐下降,驱替 19 h 后,含 油饱和度降至约 25% 并趋于稳定,直到试验结束。 前期含油饱和度上升原因为夹层的存在使得前面驱 替过来的油在 31 号位置处有短暂滞留产生"水驱 油升现象"。对比 26 号和 35 号位置含油饱和度可 知,26 号位置初始含油饱和度低,但是其剩余油饱 和度高,原因在于夹层对油注入的阻碍和注入水波 及的阻碍作用明显。26号位置含油饱和度整体上 保持缓慢下降的趋势,期间出现含油饱和度短暂升 高的现象,原因在于前面驱替过来的油在浮力作用 下上升同时被注入水驱替。26号、31号和35号位 置剩余油饱和度分别为24%、25%和21%。

4.4 坝体内储层对剩余油的影响作用

为了研究坝体内储层对剩余油的影响作用及剩 余油分布差异,选取位于同一增生体内部,砂体粒度 不同,离注水端位置相近的17号、30号和43号探 针进行含油饱和度分析。靠近夹层的30号和43号 位置含油饱和度呈阶梯状下降趋势,驱替16h后含 油饱和度趋于平稳(图8)。



Fig. 8 Comparison of oil saturation of No. 17, No. 30 and No. 43 probe

17 号位置含油饱和度总体呈下降趋势,期间出现几次短暂的微小增大,其原因为17 号位置在注入水驱替下,含油饱和度逐渐下降,上面存在夹层的遮挡,使得油会顺着夹层向16、17 号探针位置移动,造成含油饱和度短暂上升,夹层的存在使得驱替过程不平稳,表现为含油饱和度出现几次短暂的微小增大。受粒度和油水重力分异作用影响,使得43 号位置初始含油饱和度高于17 号和30 号的初始含油饱和度。受夹层遮挡作用影响程度不同,使得43 号、30 号和17 号位置剩余油饱和度依次降低,分别为28%、16%和4%。

5 结 论

(1)陆梁油田陆9井区 K₁h₂⁷⁻⁴小层平面上发育 5个河口坝复合体,垂向上为3期进积式河口坝沉 积,每期河口坝发育2~3个增生体。五级和四级界 面均为渗流屏障,三级界面中,夹层发育的位置为渗 流屏障。

(2)河口坝复合体内具顶部或底部封隔能力的 夹层比中部夹层更有利于剩余油富集。夹层发育规 模越大,倾角越大,阻碍流体运动能力就越强,越有 利于剩余油富集。

(3)河口坝中剩余油主要分布在顶部夹层和底 部夹层与隔层相交形成的锐三角形区域及中部夹层 弧线朝向一侧,在第一、二期河口坝上部和第三期河 口坝下部的其他位置也有剩余油分布。

参考文献:

 [1] 林承焰,余成林,董春梅,等.老油田剩余油分布:水下 分流河道岔道口剩余油富集[J].石油学报,2011,32
 (5):829-835.

> LIN Chengyan, YU Chenglin, DONG Chunmei, et al. Remaining oils distribution in old oilfields: enrichment of remaining oils in underwater distributary channel crotches [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(5):829-835.

[2] 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 Es_2 submember in Yong 3 fault-block reservoir in Yong'an Zhen Oilfield and its significance [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(2):10-16.

[3] 封从军,单启铜,时维成,等.扶余油田泉四段储层非 均质性及对剩余油分布的控制[J].中国石油大学学 报(自然科学版),2013,37(1):1-7.

FENG Congjun, SHAN Qitong, SHI Weicheng, et al. Reservoirs heterogeneity and its control on remaining oil distribution of K_1q^4 , Fuyu Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(1):1-7.

[4] 国景星,张勇.梁11 断块沙河街组二段河口坝砂岩体 夹层特征[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2010,34(5):7-11.

GUO Jingxing, ZHANG Yong. Interlayer characteristics of estuary dam reservoir of the 2nd member of Shahejie formation in L11 fault block [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010, 34 (5):7-11.

[5] 封从军,鲍志东,杨玲,等.三角洲前缘水下分流河道 储集层构型及剩余油分布[J].石油勘探与开发, 2014,41(3):323-329.

FENG Congjun, BAO Zhidong, YANG Ling, et al. Reservoir architecture and remaining oil distribution of deltaic front under water distributary channel [J]. Petroleum Exploration & Development, 2014, 41(3):323-329.

[6] 秦国省,吴胜和,宋新民,等.远源细粒辫状河三角洲 沉积特征与单砂体构型分析[J].中国石油大学学报 (自然科学版),2017,41(6):9-19.

QIN Guosheng, WU Shenghe, SONG Xinmin, et al. Sedimentary characteristics of distal fine-grain braided delta and architecture analysis of single sand body [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2017, 41(6):9-19.

[7] 徐丽强,李胜利,于兴河,等.辫状河三角洲前缘储层 构型分析:以彩南油田彩9井区三工河组为例[J].油 气地质与采收率,2016,23(5):50-57.

XU Liqiang, LI Shengli, YU Xinghe, et al. Analysis of reservoir architecture in the braided river delta front: a case study of the Sangonghe Formation in Block Cai9 of Cainan Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016,23(5):50-57.

- [8] 赵小庆,鲍志东,刘宗飞,等. 河控三角洲水下分流河 道砂体储集层构型精细分析:以扶余油田探 51 区块 为例[J]. 石油勘探与开发,2013,40(2):181-187.
 ZHAO Xiaoqing, BAO Zhidong, LIU Zongfei, et al. An in-depth analysis of reservoir architecture of underwater distributary channel sand bodies in a river dominated delta: a case study of T51 Block, Fuyu Oilfield [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2):181-187.
- [9] AMBROSE W A, HENTZ T F, BONNAFFÉ F, et al. Sequence-stratigraphic controls on complex reservoir architecture of highstand fluvial-dominated deltaic and lowstand valley-fill deposits in the upper cretaceous (cenomanian) woodbine group, east Texas field: regional and local perspectives [J]. AAPG Bulletin, 2009,93(2):231-269.
- [10] MIALL A D. Reconstructing the architecture and sequence stratigraphy of the preserved fluvial record as a tool for reservoir development: a reality check [J]. AAPG Bulletin, 2006,90(7):989-1002.
- [11] 王军,杨勇,张阳,等.水位变化对鄱阳湖三角洲分流 河道沉积特征的影响[J].中国石油大学学报(自然 科学版) 2017,41(1):1-10.
 WANG Jun, YANG Yong, ZHANG Yang, et al. Impact of water level change on sedimentary characteristics of distributarychannel in Poyang Lake delta[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2017,41(1):1-10.
- [12] 朱筱敏,刘媛,方庆,等. 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式:以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例[J]. 地学前缘,2012,19(1):89-99.
 ZHU Xiaomin, LIU Yuan, FANG Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake: example from cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin [J]. Earth Science

Frontiers, 2012, 19(1):89-99.

 [13] 李志鹏,林承焰,董波,等.河控三角洲水下分流河道 砂体内部建筑结构模式[J].石油学报,2012,33 (1):101-105.

> LI Zhipeng, LIN Chengyan, DONG Bo, et al. An internal structure model of subaqueous distributary channel sands of the fluvial-dominated delta [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(1):101-105.

- [14] 封从军,鲍志东,单启铜,等. 三角洲平原复合分流河 道内部单砂体划分:以扶余油田中区南部泉头组四 段为例[J]. 石油与天然气地质,2012,33(1):77-83.
 FENG Congjun, BAO Zhidong, SHAN Qitong, et al. Single sand body identification in compound distributary channel of delta plain: a case study from the fourth member of Quantou Formation in the southern part of central Fuyu Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1):77-83.
- [15] 刘自亮,仲国生,李现根. 松辽盆地大老爷府油田泉 四段三角洲前缘的沉积微相组合及特征[J]. 地球学 报,2008,29(2):228-234.

LIU Ziliang, ZHONG Guosheng, LI Xiangen. Microfacies combination and characteristics of delta front within the 4th member of the Quantou Formation in the Dalaoyefu Oil Field, Southern Songliao Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008,29(2):228-234.

[16] 杨有星,金振奎,王濮.准噶尔盆地腹部地区白垩系

呼图壁河组沉积特征[J]. 中国石油大学学报(自然 科学版),2012,36(1):40-46.

YANG Youxing, JIN Zhenkui, WANG Pu. Sedimentary characteristics of cretaceous Hutubihe formation in hinterland of Junggar Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36 (1):40-46.

 [17] 李云海,吴胜和,李艳平,等. 三角洲前缘河口坝储层 构型界面层次表征[J]. 石油天然气学报,2007,29
 (6):49-52.
 LI Yunhai, WU Shenghe, LI Yanping, et al. Hierarchi-

cal boundary characterization of delta front mouth bar reservoir architecture [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007,29(6):49-52.

- [18] 孔祥言,陈峰磊,裴柏林. 水驱油物理模拟理论和相 似准则[J]. 石油勘探与开发,1997,24(6):56-60.
 KONG Xiangyan, CHEN Fenglei, PEI Bolin. Physical simulation theory and similarity criterion of water flooding [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997,24(6):56-60.
- [19] 邹良志. 阿尔奇公式中参数的影响因素分析[J]. 国 外测井技术,2013,196(4):23-27.
 ZOU Liangzhi. Influencing factors analysis of the parameters in Archie equation [J]. World Well Logging Technology, 2013,196(4):23-27.

(编辑 徐会永)