

基于储层构型的辫状河剩余油分布规律 ——以渤海湾盆地L油田馆陶组为例

李俊飞, 尚宝兵, 徐 静, 王鹏飞, 叶小明

(中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459)

摘要:渤海湾盆地L油田馆陶组油藏为辫状河储层, 储层非均质性较强, 注水开发导致储层水淹状况复杂, 剩余油分布规律难以预测。从辫状河储层构型解剖入手, 综合应用野外露头、现代沉积、岩心、测井等资料, 建立辫状河储层构型模式, 以此为基础, 利用动静态资料分析储层构型及其控制下的储层质量差异对油水运动的影响。研究表明: 层间非均质性易产生层间干扰, 注入水优先沿储层质量好的砂体运移, 层间剩余油主要分布在与储层质量差的砂体相连通的砂体中; 平面上, 半泥质充填模式的剩余油主要富集在心滩坝边部或辫状河道; 泥质充填河道周围存在水动力滞留区, 剩余油富集于周围的心滩坝; 层内夹层的存在使得夹层下部砂体水淹, 剩余油富集在夹层上部。

关键词: 辫状河; 储层构型; 油水运动; 剩余油; 渤海湾盆地

中图分类号: TE321 **文献标志码:** A

Remaining oil distribution in braided river based on reservoir architecture: A case study from Guantao Formation of L Oilfield in Bohai Bay Basin

LI Junfei, SHANG Baobing, XU Jing, WANG Pengfei, YE Xiaoming

(Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China)

Abstract: The Guantao Formation of L Oilfield in the Bohai Bay Basin is a braided river reservoir with strong reservoir heterogeneity. Water flooding development led to complex flooding patterns, resulting in the remaining oil distribution being unpredictable. Based on the anatomy of braided river reservoir architecture, the field outcrop, modern deposition, core, and logging data were comprehensively applied to establish the braided river reservoir architecture model. On this basis, dynamic and static data were used to analyze the influence of reservoir architecture and reservoir quality differences on oil and water movement. The results show that the interlayer heterogeneity is prone to interlayer interference, the injected water is preferentially transported along with the sand bodies with good reservoir quality, and the interlayer remaining oil is mainly distributed in the sand body connected to the sand body with poor reservoir quality. On the plane, the remaining oil in the semi-muddy filling mode is mainly concentrated on the edge of the braided bar or in the braided channel. There is a hydrodynamic retention area around the muddy-filled channel, and the remaining oil is enriched in the surrounding braided bar. The existence of the interlayer makes the lower sand body water-flooded, and the remaining oil is enriched in the upper part of the interlayer.

Key words: braided river; reservoir architecture; oil-water movement; remaining oil; Bohai Bay Basin

辫状河沉积作为河流相沉积体系的重要组成部分, 是我国东部油田主要的储集类型^[1]。自20世纪80年代Miall提出储层构型^[2]概念以来, 国内学者在辫状河储层构型研究方面做了大量工作, 尤其是在辫状河储层构型解剖^[3-6]、心滩坝沉积演化及定量表征^[7-9]、隔夹层研究及三维地质建模^[10-11]等方面取得较大进展, 但关于辫状河储层构型对油水运动的影响研究较少, 而油田开发进入中后期, 剩余油的挖潜尤为重要。本文以渤海湾盆地L油田4区

馆陶组为例, 应用岩心、密井网资料以及生产动态资料, 通过层次界面分析, 建立研究区辫状河储层构型模式, 并在此基础上分析储层构型及其控制下的储层质量差异对油水运动的影响, 从而弄清储层剩余油分布规律, 为油田后期调整提供依据。

收稿日期: 2021-06-04; 改回日期: 2021-07-12。

第一作者简介: 李俊飞(1988—), 女, 硕士, 工程师, 现从事开发地质研究工作。E-mail: 719717536@qq.com。

1 研究区概况

L油田区域上位于渤海湾盆地中南部,构造处于郯庐断裂带中段,是渤南低凸起中段基底隆起背景下发育的断裂背斜构造。主力含油层系是新近系的馆陶组,储层岩性主要为细砂岩和中砂岩,局部含砾石,平均孔隙度28.3%,平均渗透率 $1\ 624\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,属于典型的中高孔中高渗储层。馆陶组发育辫状河沉积,油藏类型为层状构造油藏。4区于2008年开始投产,经过十多年的注水开发,目前采出程度19%,综合含水81%。储层水淹状况复杂,剩余油分布预测难度大,为油田中后期开发带来极大挑战。

2 辫状河储层质量分析

L油田4区辫状河储层平面上砂体横向变化快,垂向上薄互层发育,储层非均质性较强。

2.1 辫状河储层构型解剖

由于油田开发进入中后期,水淹状况复杂,辫状河储层构型解剖的重点在3~4级构型单元上,其中4级构型单元主要是识别心滩坝和辫状河道,3级构型单元主要是研究心滩坝内部的落淤层。

心滩坝电性特征表现为自然伽马和电阻率曲线呈均质韵律,辫状河道电性特征表现为自然伽马和电阻率曲线呈正韵律,心滩坝的厚度略大于辫状河道的厚度;通过野外露头及现代研究可知,剖面上,心滩坝呈底平顶凸状,辫状河道呈顶平底凸状,平面上,辫状河道呈“条带状”环绕心滩坝^[12]。在单井心滩坝和辫状河道识别的基础上,结合两者厚度的差异及规模的相关性完成连井剖面 and 构型平面展布的研究,从而完成4级构型解剖。

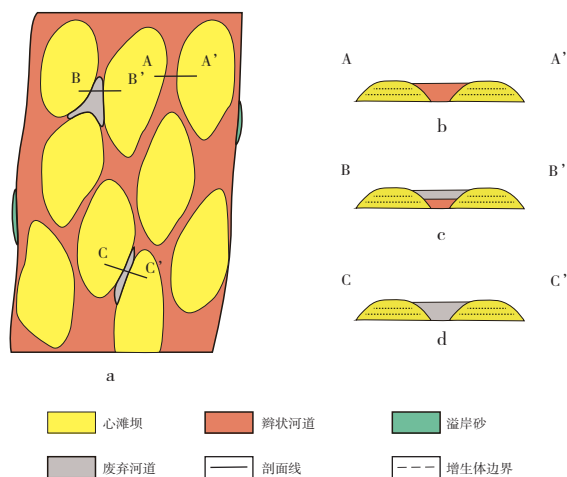
落淤层电性特征表现为自然伽马和电阻率曲线回返明显,夹层厚度0.3~1.0 m,以密闭取心井落淤层识别为基础,建立测井响应模板,对落淤层进行解释,在4级解剖的基础上,在单一心滩坝内对落淤层展布进行研究,完成3级构型解剖。

2.2 辫状河储层构型模式

以露头和现代沉积模式为指导,根据对研究区岩心观察和密井网解剖,对辫状河储层进行构型耦合,明确不同微相的构型特征,进而总结出辫状河储层构型模式(见图1)。

如图1所示,辫状河道(4级)携带的沉积物在双向环流作用下,在河道中间堆积卸载,随着沉积物增多,逐渐形成心滩坝(4级),在辫状河道边部决口

处,形成溢岸砂,因此,心滩坝的岩性较辫状河道的岩性粗,心滩坝的砂体厚度3~6 m,辫状河道的砂体厚度2~4 m;而随着物源供给的变化和河流改道的影响,辫状河道内发育砂质充填、半泥质充填和泥质充填3种充填模式。心滩坝内部发育多期垂向叠置增生体(3级),在增生体形成的间歇期发育细粒沉积物,即落淤层沉积,落淤层的岩性主要是泥岩、粉砂质泥岩和泥质粉砂岩,厚度0.3~1.0 m,由于研究区辫状河水动力较强,落淤层发育规模较小。



a.辫状河储层构型模式; b-d.辫状河道充填模式

图1 辫状河储层构型模式

2.3 储层质量差异分析

辫状河储层不同的沉积微相在沉积物粒度、泥质含量、分选及磨圆等方面有较大差异,因而辫状河储层具有较强的孔、渗非均质性。本文以储层构型单元的划分为基础,对研究区近70个分析化验数据进行分析,明确了L油田辫状河储层不同构型单元控制下的储层质量差异(见表1)。

表1 辫状河储层构型单元储层质量差异统计

构型单元	孔隙度/%		渗透率/ $10^{-3}\ \mu\text{m}^2$	
	均值	级差	均值	级差
心滩坝	29.4	1.43	272.7	56.43
辫状河道	27.7	1.26	205.6	41.71
溢岸	26.6	1.27	36.6	4.34

根据对岩心分析化验数据和构型解剖成果的分析,按照物性优劣程度将辫状河储层构型单元分为2个级别:①高孔、中渗型:即心滩坝、辫状河道,该类储层孔、渗性能最佳,但渗透率非均质性较强;②高孔、低渗型:即溢岸砂,该类储层孔隙度较好,但渗透率最低。总体来讲,不同构型单元主要在渗透率方面差别较大,导致地下油水运动复杂。

3 剩余油富集规律

剩余油的形成和分布是多因素共同作用的结果,归纳起来可分为内因和外因两种:①内因,即储层非均质性;②外因,即开发井网和开发措施与地下储层的耦合性^[13-14]。在一定的开发条件下,剩余

油的分布主要受控于储层构型及其控制下的储层质量差异,因此,本文在之前建立的辫状河储层构型模式基础上,采取“层次分析、模式拟合、多维互动、动静结合”的方法进行储层构型解剖,从层间、平面和层内三个层次,分析储层构型及储层质量差异影响的剩余油分布规律。

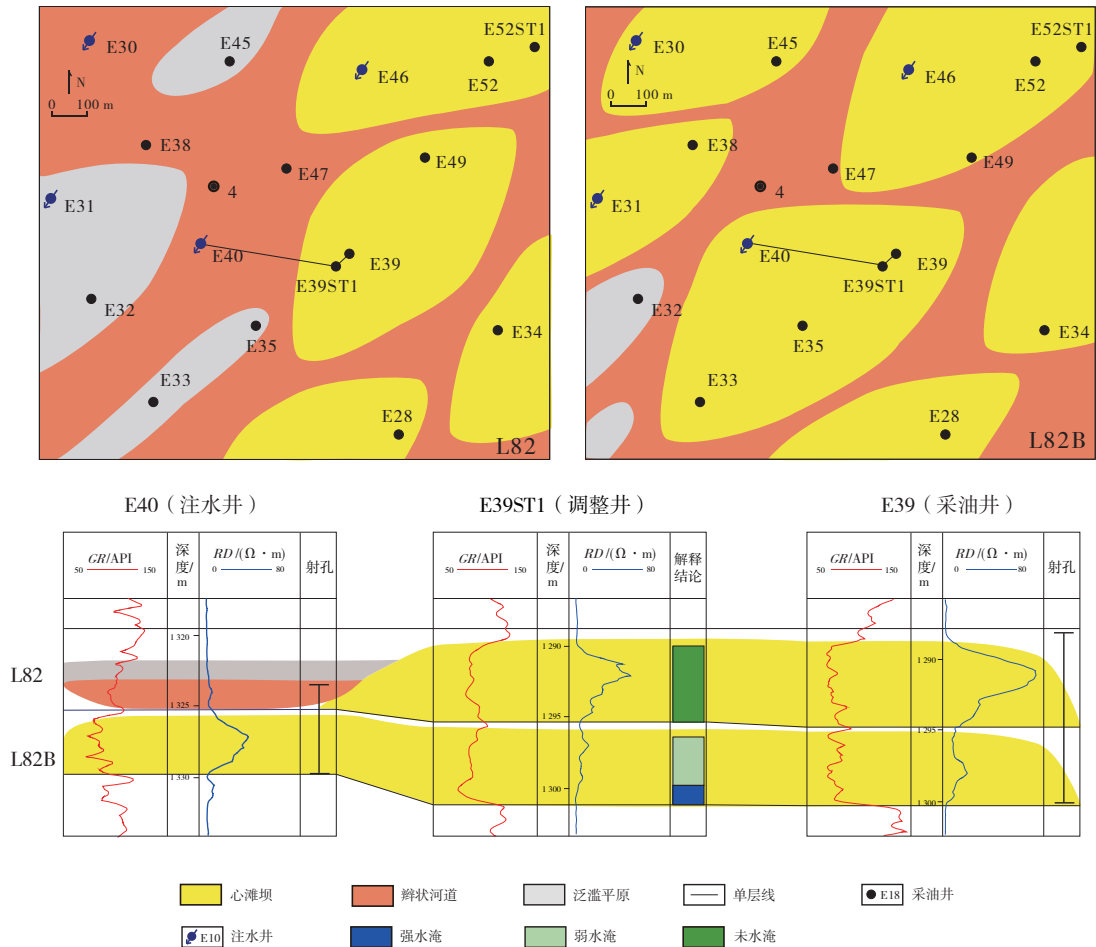


图2 层间非均质性导致的剩余油分布

3.1 层间剩余油富集特征

层间非均质性是导致层间剩余油形成的主要因素。一口井在垂向上能够钻遇储层质量各异的砂体,相对而言,储层质量好的砂体有较高的吸水能力或产液能力。在采油井中,储层质量好的砂体仅需较低的压力即可产液,且可持续产液,在长期注水受效的情况下,砂体水洗严重,采油井含水率较高。而在注水井中,储层质量好的砂体物性条件好,具有更加稳定的吸水能力,其所需的吸水压力也低;而储层质量差的砂体由于物性差,导致吸水量少或者不能吸水,从而使得与其连通的砂体剩余油富集。因此,储层质量差异是出现层间干扰的主要原因,层间剩余油主要分布在与储层质量差的砂

体相连通的砂体中,储层质量好的砂体内部存在一定程度的剩余油。

以E40注水井为例,该井垂向上分别钻遇L82和L82B两个层的河道边部和心滩坝砂体,测井解释河道边部物性明显较心滩坝砂体差很多,其吸水能力明显低于心滩坝砂体,在注采连通的情况下,L82B层注水效果肯定比L82层好,调整井E39ST1也证实该认识,其垂向上L82和L82B层测井解释分别是未水淹和弱水淹、强水淹,注入水优先淹L82B层储层质量好的心滩坝流动,未对L82层储层质量差的河道砂体进行驱替,从而导致与其连通的L82层储层质量好的心滩坝砂体未水淹(见图2)。

3.2 平面剩余油富集特征

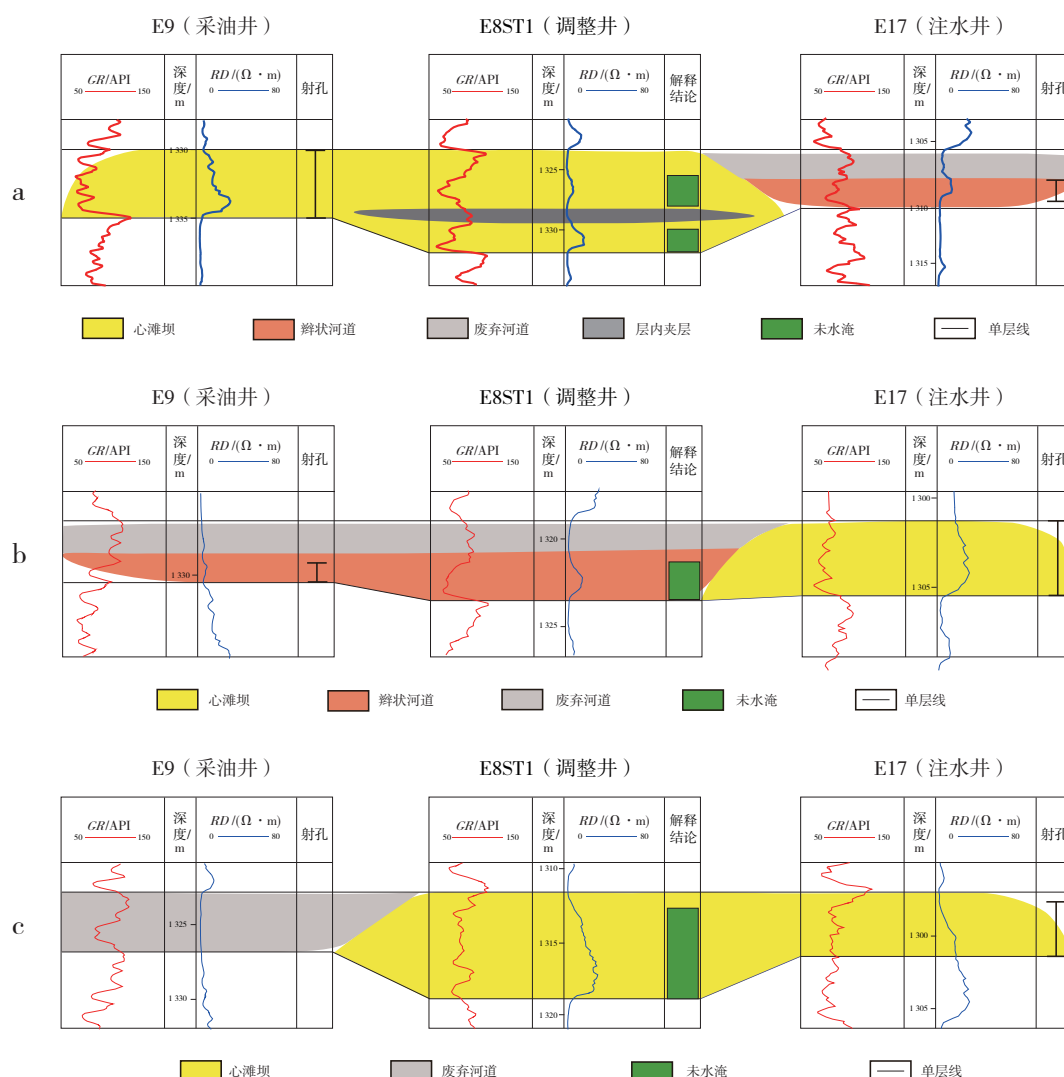
在野外露头 and 现代沉积的模式指导下,对研究区密井网条件下的辫状河储层进行构型解剖,研究区心滩坝宽度约 280~870 m,长度约 680~1 780 m,辫状河道宽度为 100~250 m。由于心滩坝的规模远大于辫状河道的规模,因此,当注水井和采油井处于同一心滩坝内,由于储层连通性好,水驱效果好,剩余油不富集。以图 2 中 L82B 单层为例,三口井钻遇同一心滩坝,在垂向渗透率差异和重力分异作用下,导致 E39ST1 井砂体底部强水淹、顶部弱水淹,剩余油不富集。

虽然辫状河道规模小,但辫状河道内发育砂质充填、半泥质充填和泥质充填 3 种充填模式,不同的辫状河道充填模式,砂体的平面接触样式各异,在一定的注采关系下,会导致不同的平面剩余油分

布,因此,对研究区辫状河道充填模式开展注采关系研究。

(1)砂质充填剩余油不富集。当心滩坝注水、辫状河道采油或者心滩坝采油、辫状河道注水,心滩坝和辫状河道储层质量好且连通性好,注采受效,导致剩余油不富集。

(2)半泥质充填剩余油富集于心滩坝边部或辫状河道。当辫状河道注水、心滩坝采油时,河道下部砂体层薄且物性差,在储层质量好的砂体层间干扰下,导致其吸水能力弱,注入水很难进行有效驱替,造成心滩坝边部滞留大量剩余油。以 L76C 单层为例,E17 井钻遇半泥质充填河道,E9 井钻遇心滩坝,由于半泥质充填河道上部存在泥质隔挡体,下部砂体物性差,砂体吸水量少,调整井 E8ST1 钻遇的心滩坝测井解释为未水淹层(见图 3a)。



a.剩余油富集于心滩边部; b.剩余油富集于河道; c.剩余油富集于心滩

图3 辫状河道充填模式导致的剩余油分布

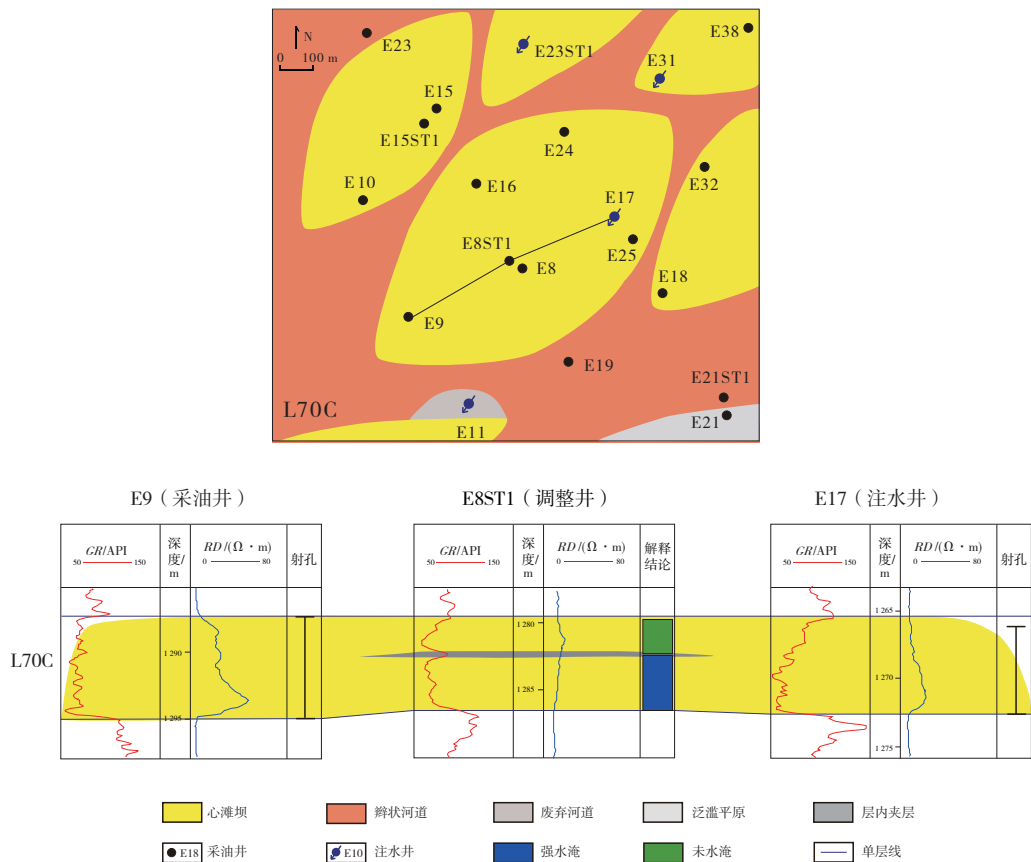


图 4 层内夹层导致的剩余油分布

当心滩坝注水,辫状河道采油时,由于辫状河道储层质量差,易被周围质量好的心滩坝旁超,导致注采不受效,使得辫状河道未水淹。以 L76B 单层为例,E17 井钻遇心滩坝,E9 井钻遇半泥质充填河道,由于 E9 井储层质量差,注入水易沿储层质量好的砂体流动,很难流动到 E9 井,调整井 E8ST1 钻遇的半泥质充填河道测井解释为未水淹层(见图 3b)。

(3)泥质充填剩余油富集于心滩坝。泥质充填河道的岩性主要是泥岩、泥质粉砂岩,在平面上,其作为隔挡体阻隔了两侧砂体内油水之间的侧向流动,使得砂体边部存在水动力滞留区,富集大量剩余油。以 L76 单层为例,E17 井钻遇心滩坝,E9 井钻遇泥质充填河道,由于泥质隔挡体的存在,使得注入水不受效,调整井 E8ST1 钻遇的心滩坝测井解释为未水淹层(见图 3c)。

3.3 层内剩余油富集特征

落淤层是心滩坝内部夹层,形成于心滩坝多期次增生的间歇期,岩性主要是泥岩、粉砂质泥岩或泥质粉砂岩。研究区辫状河水动力较强,落淤层形成后被后期水流冲刷,规模较小,仅一两口井间可

对比;心滩坝以垂向加积为主,因此,落淤层近水平分布,倾角较小。注入水在重力分异作用下,使得下部增生体水淹,剩余油在夹层上部富集。以 L70C 单层为例,心滩坝内仅保存一期落淤层,但落淤层展布范围较小,仅调整井 E8ST1 井钻遇,调整井 E8ST1 下部增生体测井解释为强水淹,上部增生体测井解释为未水淹,剩余油富集(见图 4)。

4 结论

(1)从岩性、砂体厚度、沉积样式等方面总结了辫状河储层构型模式;分析了不同构型单元的储层质量差异,认为辫状河储层构型单元孔隙度差异较小(26%~29%),渗透率非均质性较强。

(2)储层质量差异是产生层间干扰的主要原因,导致层间剩余油主要分布在与储层质量差的砂体相连通的砂体中;层内夹层的存在使得剩余油富集在夹层上部。

(3)注采对应的情况下,同一心滩坝内或砂质充填模式的剩余油不富集;半泥质充填模式的剩余油主要富集在心滩坝边部或辫状河道;泥质充填河道作为侧向隔挡体,阻隔了两侧砂体内油水的运

动,剩余油富集于周围的心滩坝。

参考文献:

- [1] 刘建民,徐守余.河流相储层沉积模式及对剩余油分布的控制[J].石油学报,2003,24(1): 58-62.
- [2] MIALD A D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits[J]. Earth Science Reviews, 1985, 22(4): 261-308.
- [3] 吴小军,苏海斌,张士杰,等.砂砾质辫状河储层构型解剖及层次建模——以新疆油田重32井区齐古组油藏为例[J].沉积学报,2020,38(5): 933-945.
- [4] 权勃,侯东梅,牟松茹,等.基于水平井信息的辫状河储层构型单元空间展布研究[J].中国海上油气,2020,32(4): 96-103.
- [5] 陈玉琨,吴胜和,毛平,等.砂质辫状河储集层构型表征——以大港油田羊三木油田馆陶组为例[J].新疆石油地质,2012,33(5): 523-526.
- [6] 余浩杰,马志欣,张志刚,等.基于储层构型表征的辫状河地质知识库构建——以苏里格气田SX密井网区为例[J].大庆石油地质与开发,2020,39(2): 1-8.
- [7] 张宪国,张育衡,张涛,等.基于沉积数值模拟的辫状河心滩演化[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(2): 1-9.
- [8] 张可,吴胜和,冯文杰,等.砂质辫状河心滩坝的发育演化过程探讨——沉积数值模拟与现代沉积分析启示[J].沉积学报,2018,36(1): 81-91.
- [9] 杨博,王树慧,王文胜,等.苏里格地区上古生界辫状河心滩定量表征影响因素探讨[J].西北大学学报(自然科学版),2019,49(6): 941-950.
- [10] 乔雨朋,邱隆伟,宋子怡,等.远源砂质辫状河储集层内部隔夹层研究与地质建模——以沾化凹陷孤东油田六区馆上段为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(1): 41-51.
- [11] 刘喜林,李红英,朱建敏,等.基于水平井网模式下的心滩内部夹层定量表征[J].断块油气田,2019,26(1): 21-24.
- [12] 李俊飞,霍春亮,叶小明,等.渤海海域L油田砂质辫状河储层构型特征[J].油气地质与采收率,2017,24(6): 48-53.
- [13] 李俊飞,王鹏飞,尚宝兵,等.基于储层构型的三角洲前缘剩余油分布规律——以渤海湾盆地S油田东营组二段下亚段I油组为例[J].断块油气田,2019,26(5): 580-586.
- [14] 冯文杰,吴胜和,许长福,等.冲积扇储层窜流通道及其控制的剩余油分布模式——以克拉玛依油田一中区下克拉玛依组为例[J].石油学报,2015,36(7): 858-870.

(编辑 谢葵)