

辫状河储层非均质性特征与剩余油分布

王春伟

(中石化经纬有限公司, 山东 东营 257015)

摘要:辫状河油藏是河流相油藏的主要类型之一,进入高含水期后,储层的非均质性严重制约着老油田的高效开发,因此,对辫状河油藏的层内非均质性研究对油田开发具有重要意义。以岩心分析、测井解释资料为基础,充分结合动态开发数据,进行了孔店油田馆陶组辫状河油藏的储层非均质性研究。结果表明:研究区主要沉积单元辫状河道及心滩储层非均质性受控于垂积作用、前积作用、填积作用以及漫积作用4种沉积作用;心滩以复合正韵律为主,稳定夹层多,而辫状河道以正韵律为主,稳定夹层少,油组、小层间隔层分布稳定,单层间隔层分布相对不稳定,平面砂体形态复杂多样;剩余油分布在层顶部以及夹层底部、物性差的主力含油层位,以及平面低渗带和过渡带。研究结果对辫状河油藏开发具有一定的指导意义。

关键词:辫状河油藏;储层非均质;剩余油;孔店油田

中图分类号:TE321 文献标志码:A

Heterogeneity characteristics and remaining oil distribution of braided river reservoir

WANG Chunwei

(Sinopec Jingwei Co., LTD., Dongying 257015, China)

Abstract: One of the most common types of fluvial reservoirs is the braided river reservoir. The heterogeneity of the reservoir severely limits the efficient development of old oilfields once they reach the high water-cut stage. As a result, research on intralayer heterogeneity in braided river reservoirs is crucial for oilfield development. The reservoir heterogeneity of a braided river reservoir in the Guantao Formation of the Kongdian Oilfield is investigated using core analysis, well logging interpretation data, and dynamic development data. The results indicate that four types of depositional processes control the heterogeneity of braided channel and central bank reservoirs in the research area's main sedimentary units: vertical deposition, foredeposition, filling, and flooding; compound positive rhythms dominate the core beach, with many stable interlayers, whereas positive rhythms dominate the braided channel, with less stable interbeds, stable distribution of oil groups and small interlayers, and relatively unstable distribution of single-layer interlayers, as well as a complex and diverse flat sandbody shape; the remaining oil is distributed at the layer's top and bottom, the major oil-bearing layer with poor physical properties, and the flat low permeability zone and transition zone. The research results have a certain guiding significance for braided river reservoir development.

Key words: braided river reservoir; reservoir heterogeneity; residual oil; Kongdian Oilfield

据统计,我国约有42.6%的油气储量富集于河流相油藏中^[1],辫状河油藏是河流相油藏的主要类型之一,主要分布在普遍进入高含水期的东部老油田。目前对储层非均质性的研究大多侧重于对储层的静态研究,而忽略了实际生产中储层非均质性对剩余油分布的影响。因此,对辫状河油藏重点应对其储层非均质性与剩余油分布关系进行分析。本文以孔店油田馆陶组为例,研究储层岩性、物性的不均一特征,明确其如何影响层内流体运动及剩

余油分布^[2-3],为提高老油田采收率提供地质依据。

1 油藏地质概况

孔店油田位于河北省黄骅县孔店村境内,其构

收稿日期:2021-08-13;改回日期:2021-10-13。

作者简介:王春伟(1988—),硕士,工程师,主要从事油气田开发地质研究。E-mail:584019559@qq.com。

基金项目:国家重点研发计划项目“油/水/固界面浸润调控智能流体提高采收率关键材料与机理研究”(2019YFA0708700)。

造位置在黄骅拗陷孔店凸起构造带的东北坡,位于歧口、沧东、盐北三个生油凹陷之间,构造面积为30 km²,含油面积为12.7 km²,油层埋深1 206.8~1 434.8 m。孔店油田主力油层馆陶组岩性为灰白

色砂岩夹紫红色、灰绿色泥岩,为砂体广泛发育的辫状河沉积。

经过40多年的注水开发,孔店油田目前处于高含水期,储层开发矛盾十分严重(见图1)。

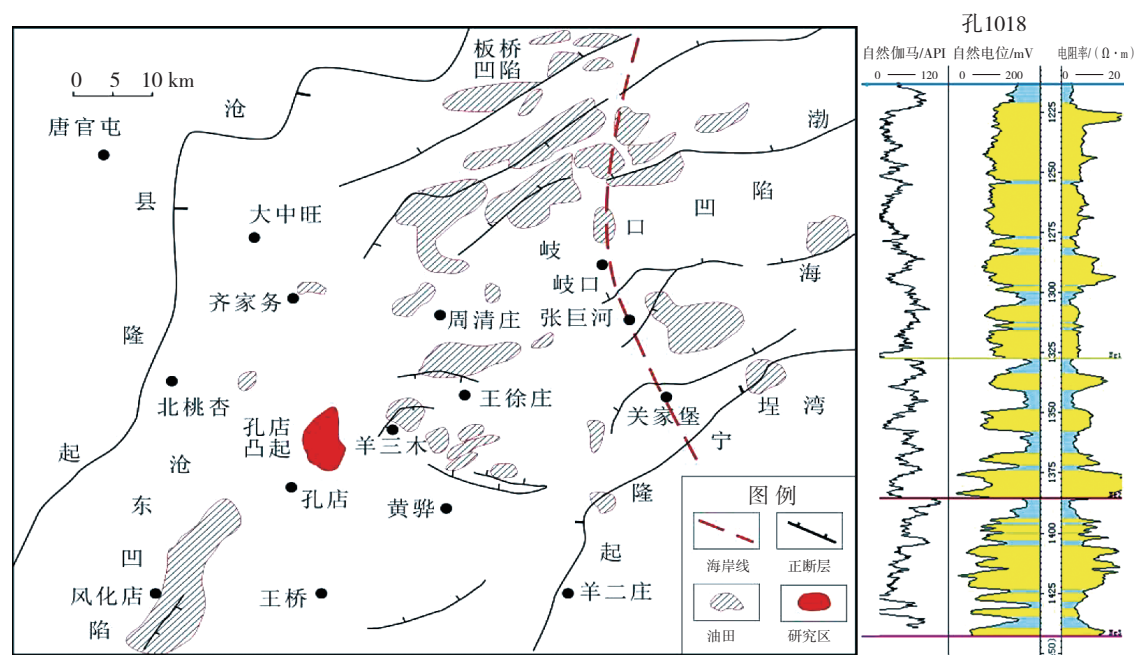


图1 孔店油田构造位置(左)与馆陶组地质剖面(右)

2 主要沉积作用与储层非均质性

研究区埋藏浅、构造平缓,储层内部的非均质性主要受控于沉积作用^[4]。
孔店油田馆陶组储层为长期不断迁移及继承

性发育的辫状河沉积,沉积作用主要有垂积作用、前积作用、填积作用以及漫积作用四种类型。辫状河的主要沉积单元为辫状河道和心滩,不同沉积作用造成不同沉积单元的储层内部的非均质性特征不同(见图2)。

沉积作用	自然电位/mV 0 — 200	岩性特征	粒度韵律/mm 0 — 1	渗透率特征/10 ⁻³ μ.m ² 0 — 5 000	剖面沉积方式	平面特征
垂积作用						
前积作用						
填积作用						
漫积作用						

图2 辫状河主要沉积作用与储层非均质关系

(1)垂积作用:河流中水流搬运能力减弱时沉积物逐渐向下沉积形成砂体的作用。粒度韵律特征一般表现为正韵律的垂向复合,渗透率差异中等。主要发育于心滩中部和底部,不同期次垂积作用之间发育落于夹层。形成的砂体在剖面上呈底平顶凸式,在平面上则呈若干土豆状交替排列。

(2)前积作用:河流中水流搬运能力减弱时沉积物依次向前沉积形成砂体的作用。粒度韵律特征为反韵律模式,渗透率差异较大,主要发育于心滩的顶部,不同期前积体之间可发育前积夹层。剖面上砂体向前依次叠置,平面上则成近似宽条形。

(3)填积作用:在限制性河道中,由于水动力变化使河流超载沉积物在河道内部充填下来的沉积作用。顶部多为粉砂岩,底部可见泥砾,粒度韵律为正韵律,渗透率差异大,主要发育于辫状河道。剖面上砂体向下冲刷与充填,平面上成条带状交叉分布。

(4)漫积作用:水流漫出河道而流速降低,沉积物在河道边部沉积下来的作用。沉积间歇性强,层内正韵律,粒度和渗透率相差不大,主要发育于堤岸和河漫平面上,形状不规则。

3 储层非均质性特征

3.1 层内非均质性特征

3.1.1 层内韵律特征

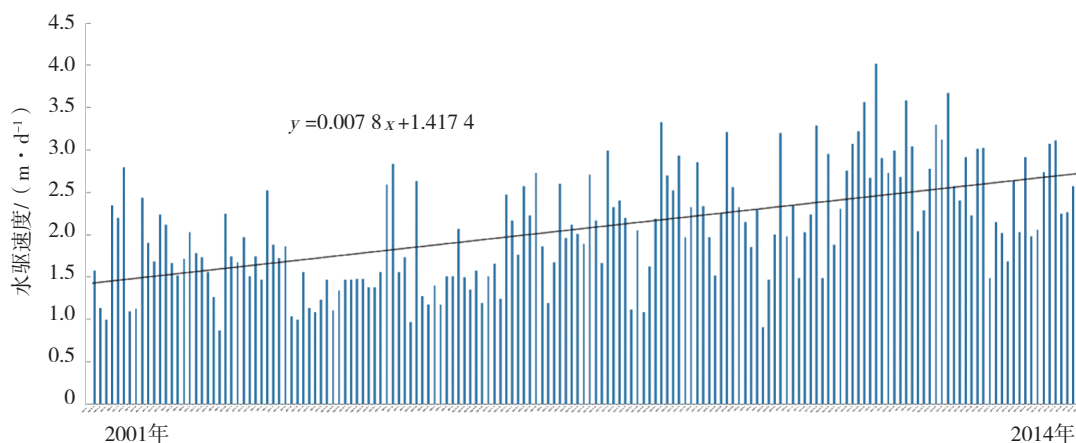


图3 孔店油田馆陶组主力层水驱速度变化

3.1.2 层内夹层特征

研究区辫状河储层的夹层以物性夹层为主,约占62%,泥质夹层占31%,钙质夹层最少,只有7%。单个夹层厚度较薄,厚度在0.3~5.0 m,1 m以下占主

要通过取心井的岩心及测井解释参数分析,总结出研究区辫状河的主要沉积单元为辫状河道和心滩分别对应的韵律特征。辫状河道以正韵律为主,占比47%;心滩则主要是复合正韵律,垂向上由两个或两个以上的正韵律叠加组成,占比53%。

据二次测井解释的结果,孔店地区馆陶组孔隙度平均值为30.7%,主要集中在25%~35%,渗透率平均值为 $670 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于高孔高渗储层;而渗透率突进系数大多介于2~3之间,变异系数基本介于0.5~0.7之间,总体属于中等非均质储层。心滩物性好,辫状河道相对差;而辫状河道的渗透率非均质程度略大于心滩(见表1)。

表1 辫状河不同沉积单元参数

沉积单元	砂体厚度/ m	孔隙度/ %	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	突进 系数	变异 系数
河道	7.9	30.2	733	2.5	0.6
心滩	12.0	30.6	804	2.4	0.5

对于疏松的辫状河储层,随着注水时间的推移,在高渗透带强烈水淹进一步提高其渗透率^[5],而注入水难以波及低渗透带,更加剧了层内非均质程度。通过对研究区注水后不同时期的示踪剂分析资料研究,得出示踪剂监测到的水驱速度呈逐年增大的趋势,表明井间高渗段渗透率随注水时间的推移逐步增大的趋势(见图3)。

要比例,倾角基本在3°以下(见图4)。

按照层内夹层的空间分布面积,可将夹层划分为稳定夹层和不稳定夹层。考虑孔店油田的生产实际,厚度大于0.4 m,横向延伸超过3个井距,在平

面及剖面上分布稳定的层内夹层,对油水的运移可以起到有效遮挡作用,可以定为稳定夹层,其他为不稳定夹层^[6]。通过利用测井、岩心资料对研究区240个井点资料进行夹层的识别,认为心滩的稳定夹层发育程度高(61%),而辫状河道虽然也发育薄夹层,但以不稳定夹层为主(75%)。

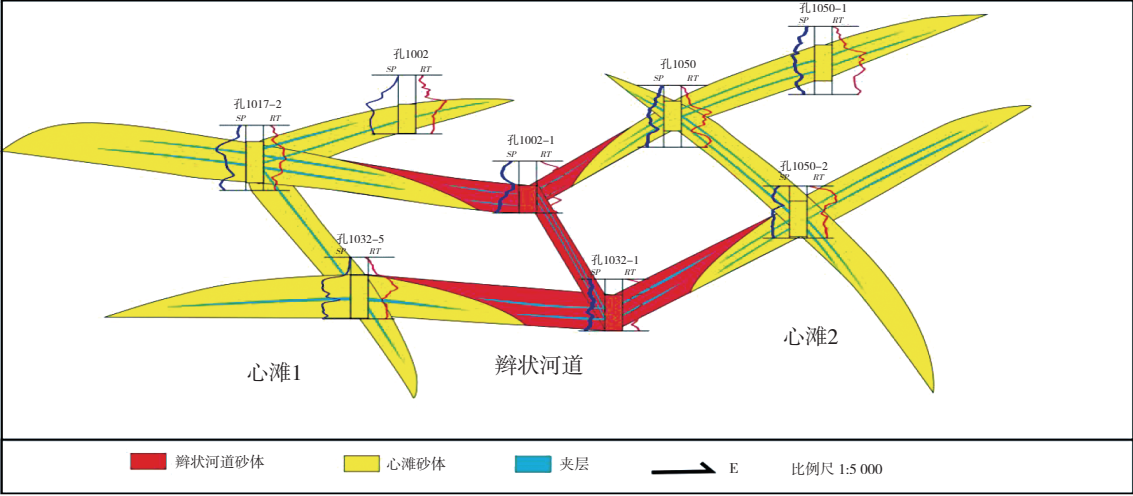


图4 辫状河储层层内夹层分布

3.2 层间非均质性特征

研究区层间渗透率突进系数大多介于2~3,变异系数基本介于0.29~0.61,层间渗透率差相对较小,渗透率非均质程度中等。油组间隔层分布范围较广,平均厚度为4.6 m,平面钻遇率为96%。小层间隔层分布相对稳定,平均厚度为3.85 m,平面钻遇率为85%。单层间隔层分布相对不稳定,平均厚度为2.9 m,平面钻遇率为73%。

3.3 平面非均质性特征

3.3.1 砂体展布特征

由于河流的迁移和长期继承性发育,研究区发育多套含油砂体,平面上单砂层砂体钻遇率较高,平均可达80%,厚度变化大,最大可达20多米,平面非均质性强,研究区砂体形态见表2。

研究区平均井距为210 m,现有井网内部控制程度较好。

表2 孔店油田馆陶组平面砂体形态类型

砂体形态	主要特点	砂体规模	发育层位	井网状况
条带状	长宽比大于20,内部厚度不均,厚度中心呈透镜状零散分布	宽度400~500 m,厚度小于5 m,砂体钻遇率51%	NgII	水驱控制程度低,有效注采井组占58%
不规则状	条带状向连片状的过渡形态	介于条带状和连片状之间,砂体钻遇率88%	NgII、NgIII	油水井同时钻遇率处于中等水平
连片状	平面上大片分布,局部可见砂体尖灭,厚度分布不均	宽度一般大于1 000 m,厚度大于7 m,砂体钻遇率97%	NgI、NgIII	水驱控制程度较高,有效注采井组占95%以上,砂体顶底起伏形态影响较大
土豆状	分布范围局限,规模小、厚度薄,在河道外部零星分布	平均长度600 m,平均宽度400 m,厚度小于4 m	NgII	砂体展布范围局限,注采井同时钻遇率低,动用程度低

3.3.2 平面物性差异

沉积作用控制着平面物性展布,因此平面物性差异主要取决于平面上沉积单元的分布^[7]。心滩物性普遍较好,而辫状河道物性相对较差,沉积单元过渡区域非均质性强。

4 储层非均质性与剩余油分布

影响剩余油分布的因素较多,而储层非均质性

是影响剩余油分布的主要因素之一^[8]。

4.1 层内非均质性与剩余油分布

不同层内韵律模式有不同的渗透率特征,体现在水驱过程中为渗流差异,造成剩余油分布情况不一。单个正韵律上部渗透率低,下部渗透率高。注水过程中,底部水淹程度较高,驱油效率较高,剩余油饱和度较小;顶部注入水波及较少,驱油效率低,剩余油饱和度较大。而对于复合韵律,垂向上由多

个韵律叠加组成,韵律间存在不稳定夹层。水驱过程中注入水沿夹层推进,增加了注入水的波及体积,而夹层底部的剩余油不易被水驱而比较富集^[9]。

孔1024井单个韵律层上部粒度细、渗透率低,下部粒度粗、渗透率高,造成各个韵律层底部水淹

程度较高,驱油效率较高,顶部注入水波及较少,驱油效率低。Ng II -3-2层顶部驱油效率只有5%~35%,底部驱油效率达到30%~55%;Ng III -1-2层顶部驱油效率只有25%~60%,底部驱油效率达到50%~70%(见图5)。

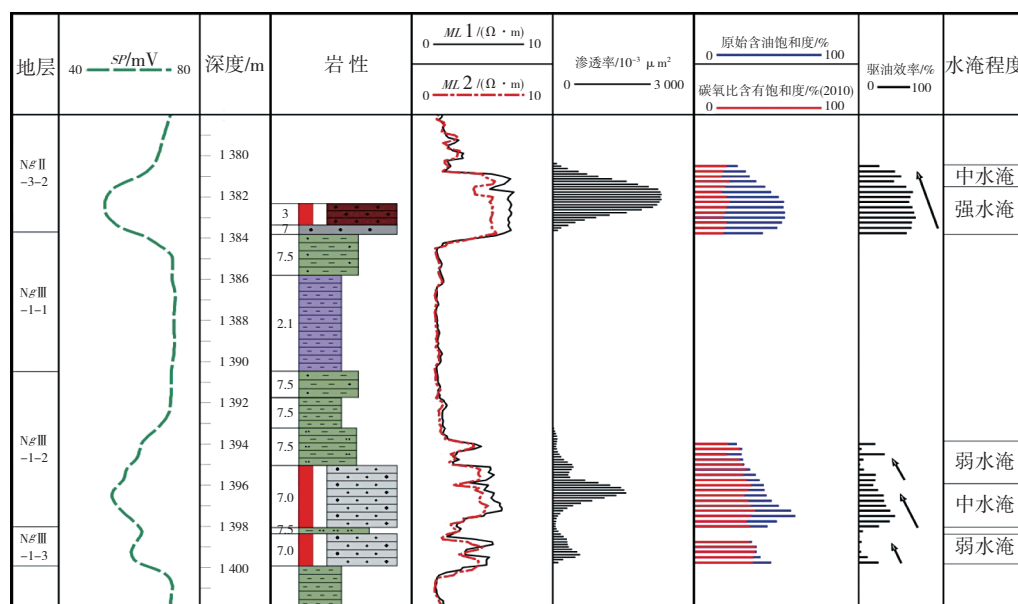


图5 孔店油田馆陶组层内、层间非均质性对剩余油分布的影响

4.2 层间非均质性与剩余油分布

研究区层间多采取合注合采的方式,易造成层间干扰。储层渗透率高的储层水驱效果好,剩余油较少,而储层渗透率低的储层水驱效果差,剩余油较多^[9]。

孔1024井Ng II -3-2层砂体厚度大、渗透率高,注入水优先沿该层突进,使之水淹程度较高,驱油效率较高,剩余油饱和度较低;而Ng III -1-2层砂体厚度小、渗透率低,由于受到层间干扰,水淹程度较低,驱油效率较低,剩余油饱和度较高。

4.3 平面非均质性与剩余油分布

由于储层在平面上砂体以及物性变化大,在注水开发期间,注入水易沿高渗带舌进,低渗带以及高低渗带过渡区域受注入水波及程度较小,所以在高渗带注采井注水效果好,产油、产液量高,而低渗带的注采井注水见效差,剩余油较富集^[10]。通过孔1064-1注采井组示踪剂分析,注水井与孔新1071井、孔61井之间分别存在 $1\,000\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$ 以上的高渗段,使其水驱速度较快,含水率高于96%,日产量大于4 t,剩余油少;而水井与孔1060-1井、孔1086K井之间渗透率分别低于 $1\,000\times 10^{-3}\,\mu\text{m}^2$,致使

其水驱速度相对较慢,含水率低于90%,日产量小于3 t,累产油量低,剩余油多(见图6)。

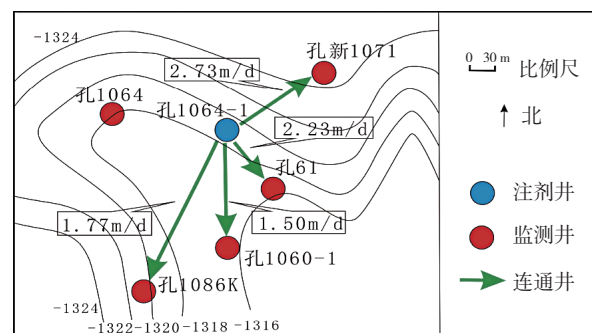


图6 平面物性非均质性对剩余油分布的影响

5 结论

(1)孔店油田馆陶组储层的非均质性主要受控于河流相的沉积作用,分别为垂积作用、前积作用、填积作用和漫积作用,不同沉积作用影响着心滩与辫状河道不同沉积单元的储层非均质性。

(2)研究区层内非均质程度中等,心滩以复合正韵律为主,稳定夹层多,而辫状河道以正韵律为主,稳定夹层少;层间非均质程度中等,油组、小层间隔层分布稳定,单层间隔层分布(下转第57页)

知识库,完成沉积微相展布研究,指导了油田的调整及挖潜。

参考文献:

[1] 王渝明.陆相沉积地层油层对比方法[M].北京:石油工业出版社,2001:117-127.
 [2] 隋军.大庆油田河流—三角洲相储层研究[M].北京:石油工业出版社,2000:80-85.
 [3] 申春生,罗宪波,孟鹏,等.渤海 L 油田小层对比研究[J].中国海上油气,2012,24(S1):97-100.
 [4] 王西文,苏明军,王大兴,等.相控—等时小层对比方法及应用[J].石油勘探与开发,2003,30(6):78-80.
 [5] 刘伟方,于兴河,孙勤华,等.井震联合分级控制小层对比方法[J].石油物探,2006,45(6):597-601.
 [6] 胡光义,范廷恩,梁旭,等.河流相储层复合砂体构型概念体系、表征方法及其在渤海油田开发中的应用探索[J].中国海上油气,2018,30(1):89-98.
 [7] 胡光义,范廷恩,陈飞,等.从储层构型到“地震构型相”——一种河流相高精度概念模型的表征方法[J].地质学报,2017,91(2):465-478.

[8] 赵春明,胡景双,霍春亮,等.曲流河与辫状河沉积砂体连通模式及开发特征——以渤海地区秦皇岛 32-6 油田为例[J].油气地质与采收率,2009,16(6):88-91,116.
 [9] 马华平,霍梦颖,何俊,等.渤海湾盆地秦皇岛 32-6 油田曲流河沉积体系综合解剖[J].新疆石油地质,2017,38(5):567-574.
 [10] 林承焰,张宪国,董春梅.地震沉积学及其初步应用[J].石油学报,2007,28(2):69-72.
 [11] 徐兆辉,胡素云,王露,等.地震沉积学在不同沉积相和储集层研究中的应用[J].古地学报,2020,22(4):727-743.
 [12] 刘彩燕,潘树新,梁苏娟.松辽盆地西部地区地震沉积相研究[J].地球物理学进展,2017,32(5):2044-2050.
 [13] 李磊,张鹏,邹韵,等.莺歌海盆地东方 X 区浅海地震沉积相[J].海洋地质前沿,2019,35(3):31-39.
 [14] 李宏军,郑振英,姚芳,等.复杂断块等时地层格架建立方法[J].断块油气田,2009,16(1):6-8.

(编辑 谢 葵)

(上接第 52 页) 相对不稳定;平面砂体形态复杂多样,井网控制程度好,平面物性受控于沉积单元的展布。

(3)从层内、层间、平面三个方面分析了储层非均质性对剩余油分布的影响,层内剩余油主要分布在层顶部以及夹层底部,层间剩余油主要分布在物性差的主力含油层位,平面上低渗带及高低渗过渡带剩余油较富集。

参考文献:

[1] 陈欢庆.中国石油精细油藏描述进展与展望[J].中国地质,2021,48(2):424-446.
 [2] 秦婷婷,傅强,李林祥,等.非均质高含水油藏流场调整提高采收率研究——以孤东油田七区西区块馆陶组为例[J].石油地质与工程,2021,35(3):67-72.
 [3] 肖文联,杨玉斌,李闯,等.鄂尔多斯盆地不同类型储集层水驱油特征实验[J].石油勘探与开发,2021,48(4):807-816.
 [4] 张静,蔡晖,刘斌,等.厚层油藏高含水期基于剩余油的分层精细注水[J].复杂油气藏,2021,14(1):51-56.

[5] 王妍,王若谷,魏克颖,等.基于随机森林的致密储层分类——以延安气田东部盒 8 段为例[J].西安石油大学学报(自然科学版),2021,36(6):1-8.
 [6] 侯娟,黄帅博,柯思,等.旬宜地区延长组长 7 致密油特征与富集主控因素[J].西北地质,2021,54(4):171-179.
 [7] 王猛,叶青,袁丙龙,等.基于量化参数的储层非均质性分布规律研究——以涪西南凹陷为例[J].断块油气田,2020,27(5):597-602.
 [8] 李源流,郭彬程,杨兆平,等.横山地区三叠系延长组长 61 沉积微相特征及其对储层非均质性的影响[J].西北大学学报(自然科学版),2020,50(5):840-850.
 [9] 康保平,钟玉梅,刘昊年,等.四川盆地西部雷口坡组第四段储层非均质性[J].天然气勘探与开发,2020,43(3):19-29.
 [10] 高阳东,向绪洪,张向涛.南海北部新生代沉积演变及其油气地质意义[J].天然气地球科学,2021,32(5):645-656.

(编辑 谢 葵)