



辫状河油藏层内非均质性及其对剩余油分布的影响

王春伟¹, 董佑桓¹, 杨勇², 杨向东³, 陈鑫¹

1. 中石化经纬有限公司地质测控技术研究院, 山东 青岛 266000;
2. 山东省煤田地质局第五勘探队, 山东 济南 250100;
3. 海域泰和(山东)能源科技有限公司, 山东 东营 257000

摘要: 辫状河油藏是我国主要油藏类型之一, 目前普遍进入高含水期, 层内非均质严重制约其高效开发。本文以孔店油田馆陶组岩心、测井资料为基础, 结合生产开发数据, 分析了辫状河油藏层内非均质性及其对剩余油分布的影响。结果表明: 研究区储层成因为辫状河道及心滩。辫状河道为正韵律, 物性差异大, 夹层薄; 而心滩以复合正韵律为主, 物性差异中等偏强, 夹层厚。由心滩对应的采油井夹层控制的剩余油较多, 垂积体的上部易形成剩余油富集区, 挖掘潜力大。

关键词: 辫状河油藏; 层内非均质; 剩余油; 馆陶组; 孔店油田

HETEROGENEITY IN BRAIDED RIVER RESERVOIR AND ITS INFLUENCE ON REMAINING OIL DISTRIBUTION

WANG Chun-wei¹, DONG You-huan¹, YANG Yong², YANG Xiang-dong³, SUN Xin¹

1. Institute of Geological Measurement and Control Technology, Jingwei Co., Ltd., Sinopec, Qingdao 266000, Shandong Province, China;
2. No. 5 Exploration Team, Shandong Bureau of Coalfield Geology, Jinan 250100, China;
3. Haiyu Taihe (Shandong) Energy Technology Co., Ltd., Dongying 257000, Shandong Province, China

Abstract: As one of the major reservoir types in China, braided river reservoir has generally entered the high water-cut stage, and its efficient development is seriously restricted by the in-layer heterogeneity. Based on the core and well logging information of Guantao Formation in Kongdian Oilfield, the in-layer heterogeneity of braided river reservoir and its influence on remaining oil distribution are analyzed combined with the production and development data. The results show that the reservoir in the area is formed by braided channel and channel bar. The braided channel shows normal rhythm, with great physical difference and thin interlayer; while the channel bar is dominated by composite normal rhythm, with medium physical difference and thick interlayer. There is much remaining oil controlled by the interlayer of production well corresponding to channel bar. The remaining oil enriched area is easily formed in the upper interlayer of vertical deposit body, which has great developing potential.

Key words: braided river reservoir; intra-layer heterogeneity; remaining oil; Guantao Formation; Kongdian Oilfield

0 引言

据统计, 我国约有 42.6% 的油气储量富集于河流

相油藏中, 辫状河油藏是河流相油藏的主要的类型之一, 主要分布在普遍进入高含水期的东部老油田^[1]。

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2021-11-11. 编辑: 张哲.

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”(编号 2019YFA0708700); 中石化石油工程公司研发计划项目“测录定一体化技术应用平台研究”(SG20-16K).

作者简介: 王春伟(1988—), 男, 回族, 硕士, 工程师, 主要从事油气藏开发方面的研究, 通信地址 山东省青岛市台湾路 4 号, E-mail//584019559@qq.com

目前这些油田都存在储层内部水淹程度差异大, 剩余油分布复杂的严峻问题. 因此, 对于辫状河油藏的研究重点应对其层内的非均质性进行剖析. 本文以孔店油田馆陶组为例, 研究储层内部的韵律特征、物性差异及夹层展布情况, 明确各要素如何影响剩余油的分布规律^[2-3], 进而为提高老油田采收率提供依据.

1 油藏地质概况

孔店油田位于河北省黄骅县境内, 构造位置为孔店凸起构造带的东北坡, 处于歧口、沧东、盐北3个生油凹陷之间, 构造面积30 km², 含油面积12.7 km². 新近系馆陶组是孔店油田主力油层, 分为馆I、馆II、馆III共3个油组, 岩性为灰白色砂岩夹紫红色泥岩, 为辫状河沉积(图1). 经过40多年的注水开发, 孔店油田目前处于高含水期, 剩余油分布零散, 储层开发矛盾十分严重.

2 主要沉积作用与层内非均质性

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^[4-5], 辫状河主要沉积单元辫状河道、心滩受控于侧积、垂积、填积和漫积4种沉积作用的影响^[6], 见图2.

1) 垂积作用: 水流搬运能力减弱时沉积物逐渐向下沉积, 一般表现为正韵律的垂向复合, 渗透率差异中等, 发育于心滩. 不同期次垂积作用之间发育落淤夹层.

2) 前积作用: 水流搬运能力减弱时沉积物依次向前沉积, 一般为正韵律模式, 渗透率差异较大, 发育于心滩. 不同期前积作用之间可发育前积夹层.

3) 填积作用: 在限制性河道中, 由于水动力变化, 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, 多为正韵律, 渗透率差异大, 发育于辫状河道.

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, 为正韵律, 粒度和渗透率相差不大, 发育于辫状河道.

3 层内非均质性特征

3.1 层内韵律性

通过取心井的岩心及测井解释参数分析, 总结得到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^[7-8]. 其中辫状河道以正韵律为主, 占47%; 心滩则主要是复合正韵律, 垂向上由2个或2个以上的正韵律叠加组成, 单个正韵律之间通过夹层分隔开来, 占53%.

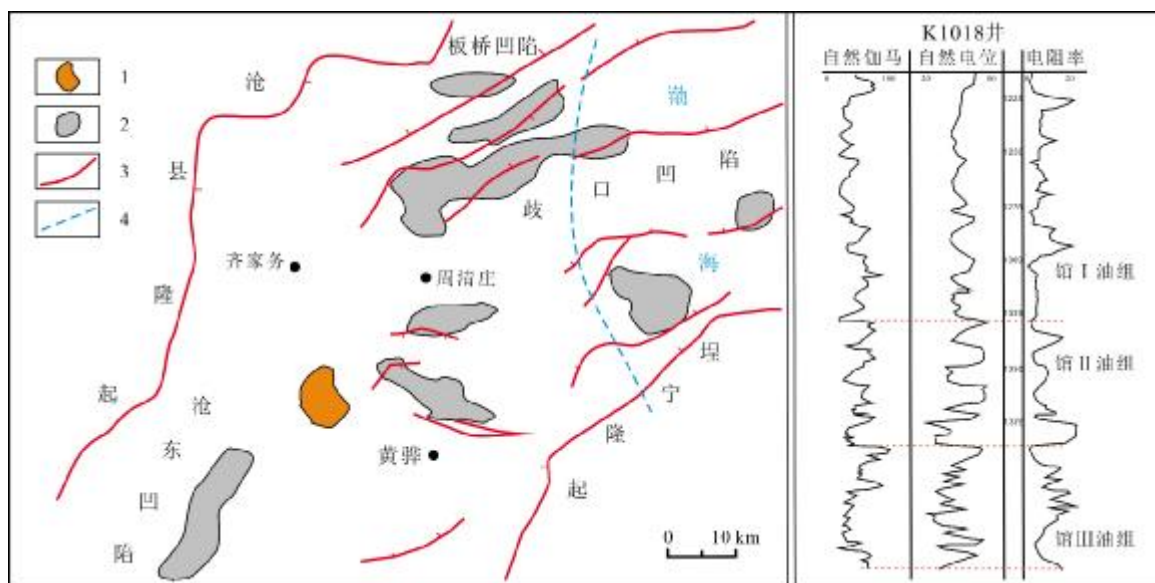


图1 孔店油田构造位置及馆陶组地质剖面图

Fig. 1 Tectonic location of Kongdian Oilfield and geological section of Guantao Formation

1—研究区位置(study area); 2—油区位置(oil province); 3—断层(fault); 4—海岸线(coastline)

沉积作用	岩性	粒度韵律	物性特征	非均质性	夹层
侧积			高渗	强	多
垂积			高渗	中等	多
填积			高渗	强	较少
漫积			中渗	弱	少见

图2 辫状河主要沉积作用与层内非均质关系

Fig. 2 Relationship between main sedimentation and intra-layer heterogeneity of braided river

1—泥岩(mudstone); 2—粉砂岩(siltstone); 3—细砂岩(fine sandstone); 4—粗砂岩(coarse sandstone)

3.2 层内渗透率非均质程度

据二次测井解释的结果,研究区孔隙度平均为30.7%,渗透率值平均为 $670 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于高孔高渗储层;而渗透率突进系数大多介于2~3之间,变异系数一般介于0.5~0.7之间,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(表1).

表1 辫状河不同微相储层参数表

Table 1 Reservoir parameters for different microfacies of braided river

微相	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	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渗透率会变大^[9-10],加剧了非均质程度.通过对研究区注水后不同时期的示踪剂资料分析得出,示踪剂监测出的水驱速度由2001年的1.5 m/d上升至2014年的3 m/d,表明了随注水时间推移,井间高渗段渗透率逐步增大的趋势,见图3.

3.3 层内夹层

夹层是指位于单砂层内部的非渗透层或低渗透层,有物性夹层、钙质夹层及泥质夹层3种^[11-12].经统计,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,在0.3~5 m之间,倾角基本都在3°以下,整体发育平缓,见图4.

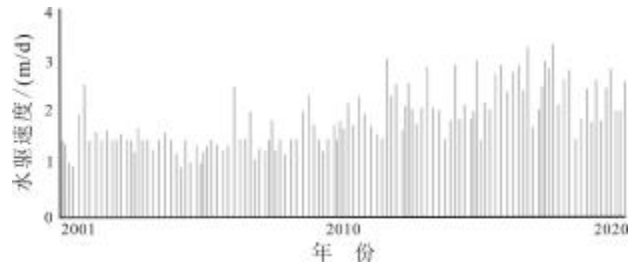


图3 孔店油田馆陶组主力层水驱速度变化图

Fig. 3 Water drive velocity changes of Guantao Formation in Kongdian Oilfield

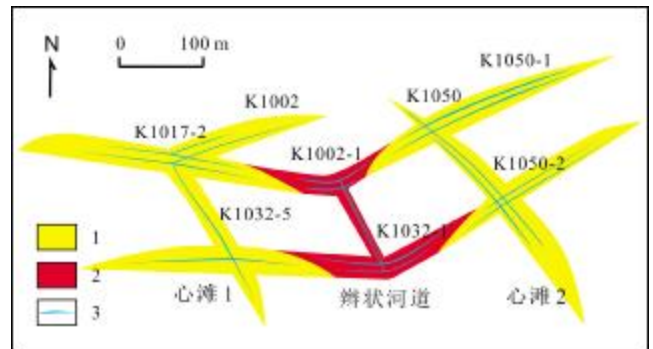


图4 辫状河储层层内夹层分布图

Fig. 4 Distribution of interlayers in braided river reservoir

1—心滩(channel bar); 2—辫状河道(braided channel); 3—夹层(interlayer)

按照层内夹层的空间分布面积,可以将夹层划分为稳定夹层和不稳定夹层^[13].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^[14-15].利用测井、岩心资料对研究区240个井点进行夹层的识别,认为心滩的稳定夹层发育程度高(占61%),而辫状河道不稳定夹层为主(占75%).

4 层内非均质性对剩余油分布的影响

4.1 井点层内非均质性

对于非均质程度较高的储层,注入水先沿着高渗透带突进,使得注入水波及系数变小^[16-17].而针对辫状河储层,高渗段一般位于单个正韵律的下部,储层底部水洗严重,顶部剩余油富集^[18-19].夹层在储层内部形

成渗流屏障,对储层内流体有明显的隔档作用.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.上韵律层顶部驱油效率只有 5%~35%,底部驱油效率达到 30%~55%;下韵律层顶部驱油效率只有 25%~60%,底部驱油效率达到 50%~70%(见图 5).

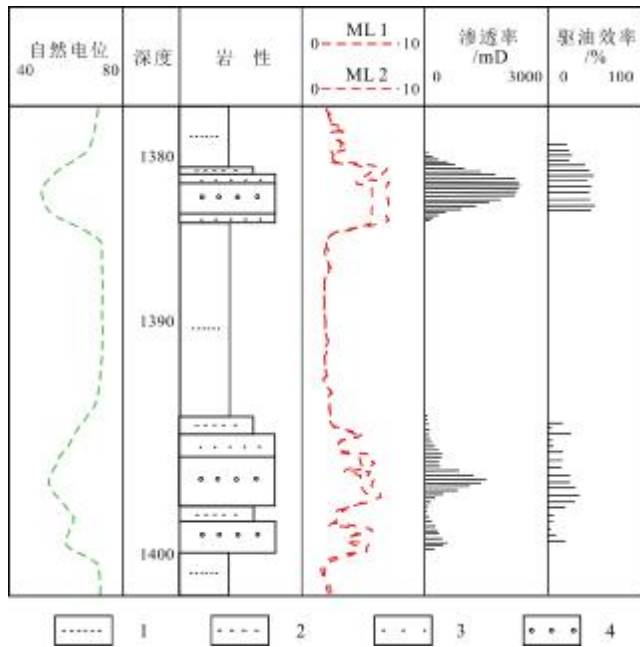


图 5 井点层内非均质对剩余油分布的影响

Fig. 5 Influence of in-layer heterogeneity on remaining oil distribution in well

1—泥岩 (mudstone); 2—粉砂岩 (siltstone); 3—细砂岩 (fine sandstone); 4—粗砂岩 (coarse sandstone)

4.2 井间层内非均质性

对于采油井,夹层的隔档作用导致储层内局部的驱替效果变差;对于注水井,它又能增大注入水的波及体积^[20].根据辫状河储层层内非均质特性与注采井的配置关系,可以分成以下 4 种类型(见图 6).

1)注水井和采油井均对应心滩(如实例①③,模式 a):该类型约占 39%,油井单位储层厚度年均单井产油量为 129 t.注入水沿单个韵律底部突进,多段水淹,单个韵律的顶部和夹层的底部由于注入水波及不到,剩余油富集,总体上水淹厚度小,夹层控制的剩余油多,挖掘潜力大.

2)注水井对应辫状河道而采油井对应心滩(如实例②③,模式 b):该类型约占 22%,该类油井单位储层

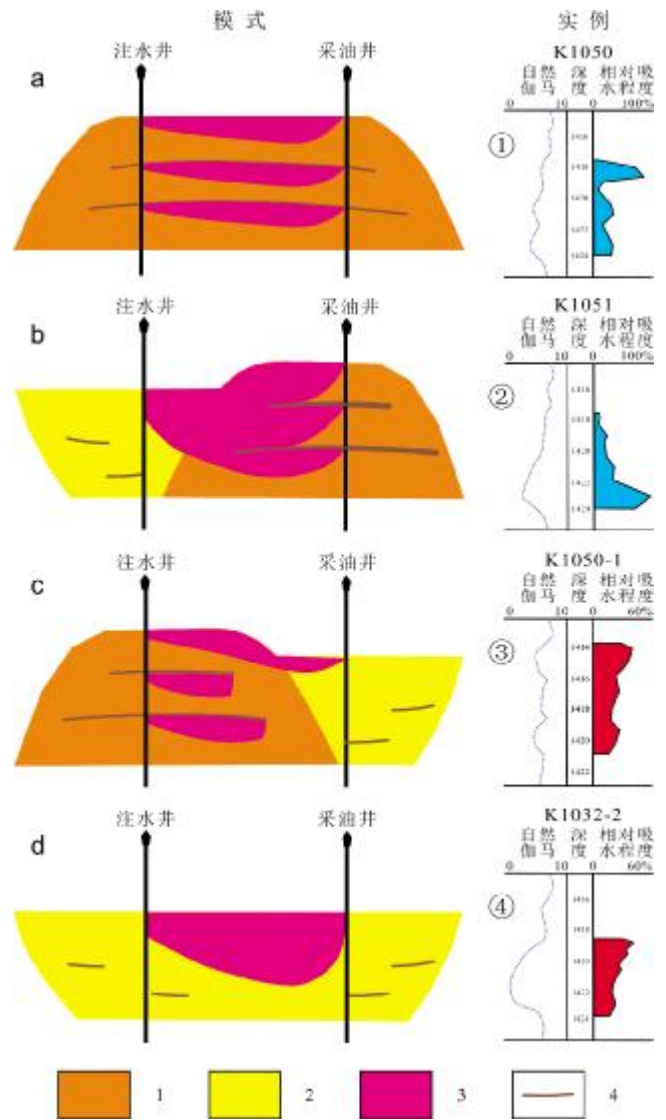


图 6 井间层内非均质对剩余油分布的影响

Fig. 6 Influence of interwell in-layer heterogeneity on remaining oil distribution

1—心滩 (channel bar); 2—辫状河道 (braided channel); 3—剩余油富集区 (remaining oil enriched area); 4—夹层 (interlayer)

厚度年均单井产油量为 145 t.注水后油水运动规律复杂,若夹层在垂向上分布位置偏上,注入水波及不到夹层以上的区域,形成剩余油富集区;若夹层在垂向上分布位置偏下,注入水沿夹层攀升,会有一定的水驱效果.总体上开发效果较差,潜力较大,剩余油仍是富集在单个夹层的下部.

3)注水井对应心滩而采油井对应辫状河道(如实例①④,模式 c):该类型约占 28%,该类油井单位储层厚度年均单井产油量为 226 t.由于夹层的存在,注入

水分段推进,加上储层厚度的变化,相对高部位的注入水对相对低部位储层形成范围较大的水洗,水驱效果好,剩余油较少。

4)注水井和采油井均对应辫状河道(如实例②④,模式d):该类型约占11%,该类油井单位储层厚度年均单井产油量为165 t。该类型具有一般正韵律的水驱特点,注水后注入水沿整个储层底部快速突进,水淹厚度较小,到开发后期形成底部水淹强烈、顶部剩余油富集的特点。

5 结论

1)研究区主要发育垂积作用、前积作用、填积作用以及漫积作用4种沉积作用,不同的沉积作用控制着辫状河道、心滩两种主要沉积单元内部的非均质性。

2)研究区辫状河储层非均质程度中等。两种主要的沉积单元中,辫状河道以正韵律为主,物性相对较差,虽然也发育薄夹层,但以不稳定夹层为主;心滩则主要是复合正韵律,物性相对较好,稳定夹层发育程度高。

3)研究区井点层内非均质性对剩余油分布的影响主要体现在储层底部水洗严重,顶部剩余油富集;而井间层内非均质性对剩余油分布的影响则主要是注水井对应心滩而采油井对应辫状河道时注水后注入水的波及体积变大,剩余油较少。注水井和采油井均钻遇心滩与注水井对应辫状河道、采油井对应心滩注水后水淹厚度小,剩余油较多。

参考文献(References):

- [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.
Chen H Q. Progress in the fine description of reservoirs in China and its prospect[J]. Geology in China, 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.
Qin T T, Fu Q, Li L X, et al. Study on improving oil recovery by flow field adjustment in heterogeneous high water cut reservoir: By taking Guantao Formation from the west block of Block 7 of Gudong Oilfield as an example[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2021, 35(3): 67-72.
- [3]肖文联,杨玉斌,李闽,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.

- Xiao W L, Yang Y B, Li M, et al. Experimental study on the oil production characteristics during the waterflooding of different types of reservoirs in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(4): 807-816.
- [4]赵淑霞,孙爽,周银邦,等.基于精细岩相约束的致密低渗储层参数建模研究——以红河油田92井区长812致密砂岩储层为例[J].地质与资源,2019,28(5):460-469.
Zhao S X, Sun S, Zhou Y B, et al. Parameter modeling of low permeability tight reservoir based on fine lithofacies constraint: A case study of C-812 tight sandstone reservoir in No.92 wellblock of Honghe Oilfield [J]. Geology and Resources, 2019, 28(5): 460-469.
- [5]王爱,钟大康,刘忠群,等.深层致密砂岩储层特征及物性控制因素——以川东北元坝西地区须二下亚段为例[J].沉积学报,2022,40(2):410-421.
Wang A, Zhong D K, Liu Z Q, et al. Characteristics of deep tight sandstone reservoirs and their controlling factors of physical properties: A case study of the Xu-2 Member in the western Yuanba area of the northeastern Sichuan Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 410-421.
- [6]张祥龙,刘一仓,张攀,等.沉积微相控制下储层分类评价及预测——以鄂尔多斯盆地环西-彭阳南段地区长8段为例[J].沉积学报,2022,40(2):534-546.
Zhang X L, Liu Y C, Zhang P, et al. Reservoir classification evaluation and prediction in terms of sedimentary microfacies: A case study from Chang 8 section in Huanxi-Pengyang south section, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(2): 534-546.
- [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.
Wang M, Ye Q, Yuan B L, et al. Distribution regularity research of reservoir heterogeneity based on quantitative parameters: A case study of Weixinan Sag[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 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.
Li Y L, Guo B C, Yang Z P, et al. Characteristics of sedimentary microfacies of Triassic Yanchang Formation Chang 61 in Hengshan area and its effect on reservoir heterogeneity[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 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.
Kang B P, Zhong Y M, Liu H N, et al. Reservoir heterogeneity of Leikoupo 4 Member, western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(3): 19-29.
- [10]陈彬滔,于兴河,王磊,等.河流相沉积的河型转换特征与控制因素及其油气地质意义——以南苏丹Melut盆地Ruman地区坳陷期Jimidi组为例[J].沉积学报,2021,39(2):424-433.

- Chen B T, Yu X H, Wang L, et al. Features and controlling factors of river pattern transition in fluvial deposition and its significance for petroleum geology: An insight from the Jimidi Formation in the Ruman area, Melut Basin, South Sudan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(2): 424-433.
- [11]张会卿. 心滩坝内部构型及剩余油分布规律研究与应用[J]. *新疆石油天然气*, 2018, 14(1): 27-31.
- Zhang H Q. Research and application of mid-channel bar internal architecture and remaining oil distribution[J]. *Xinjiang Oil & Gas*, 2018, 14(1): 27-31.
- [12]杨少春, 赵晓东, 钟思瑛, 等. 辫状河心滩内部非均质性及对剩余油分布的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(3): 1066-1074.
- Yang S C, Zhao X D, Zhong S Y, et al. Inner heterogeneity within braided bar of braided river reservoir and its influence on remaining oil distribution[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(3): 1066-1074.
- [13]喻建, 张严, 赵会涛, 等. 鄂尔多斯盆地志靖-安塞地区延长组长10储层特征及评价[J]. *地质与资源*, 2019, 28(4): 364-371.
- Yu J, Zhang Y, Zhao H T, et al. Characteristics and evaluation of C-10 reservoir in Zhijing-Ansai area, Ordos Basin[J]. *Geology and resources*, 2019, 28(4): 364-371.
- [14]符勇, 黄礼, 白玉彬, 等. 靖边油田L区块长6油层组沉积特征[J]. *地质与资源*, 2019, 28(1): 49-56.
- Fu Y, Huang L, Bai Y B, et al. Sedimentary characteristics of C-6 reservoir in L Block of Jingbian Oilfield[J]. *Geology and Resources*, 2019, 28(1): 49-56.
- [15]苟兆杰, 钟建华, 李勇, 等. 鄂尔多斯盆地靖边油田马宁区长2油层组储层特征研究[J]. *地质与资源*, 2016, 25(6): 550-557.
- Xun Z J, Zhong J H, Li Y, et al. Characteristics of the C-2 reservoir in Maning area of Ordos Basin[J]. *Geology and Resources*, 2016, 25(6): 550-557.
- [16]董虎, 杨建国, 吴国强, 等. 基于数字岩心技术的陆相页岩油微观结构特征及主控因素——以松辽盆地白垩系青山口组一段泥页岩为例[J]. *地质与资源*, 2021, 30(3): 377-384.
- Dong H, Yang J G, Wu G Q, et al. Digital core technology-based microstructure characteristics and main controlling factors of continental shale oil: A case study of shale in Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(3): 377-384.
- [17]熊量莉, 杨楚鹏, 吴蛟蛟, 等. 南海南-北陆缘盆地地层沉积发育特征及其对油气成藏的差异性控制[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1407-1425.
- Xiong L L, Yang C P, Wu J Q, et al. Characteristics of stratigraphic sedimentary in the south-north continental margin basin of the South China Sea and its differential control on hydrocarbon accumulation [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1407-1425.
- [18]颜冠山, 刘宗宾, 宋洪亮, 等. 多层构造油藏纵向细分计算单元对储量参数及结果的影响[J]. *地质与资源*, 2020, 29(4): 342-350.
- Yan G S, Liu Z B, Song H L, et al. Effect of vertical subdivision of computing units on reserve parameters and results of multilayer structural reservoir[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(4): 342-350.
- [19]柳波, 刘俊杰, 付晓飞, 等. 松辽盆地陆相页岩油地质研究方法 with 勘探评价进展[J]. *地质与资源*, 2021, 30(3): 239-248.
- Liu B, Liu J J, Fu X F, et al. Progress in geological research methods and exploration evaluation of continental shale oil in Songliao Basin [J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(3): 239-248.
- [20]周路路, 刘俊刚, 舒广强, 等. 松辽盆地北部三肇凹陷升554断块特低渗油气储层流动单元研究[J]. *中国地质*, 2021, 48(3): 807-819.
- Zhou L L, Liu J G, Shu G Q, et al. Research on flow units of ultra-low permeability oil-gas reservoirs in Sheng 554 fault block of Sanzhao depression, northern Songliao Basin[J]. *Geology in China*, 2021, 48(3): 807-819.