

海上L区低渗储层分类评价及有利区优选

张学敏¹, 但玲玲¹, 魏莉¹, 许靖康², 朱建英¹

(1. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452; 2. 延边大学工学院, 吉林 延吉 133002)

摘要:海上L区目标层属于海上特低渗储层, 为准确进行储层分类评价、指导储层有利区的优选, 在统计借鉴已有低渗储层分类评价成果基础上, 结合目标区低渗储层特征, 厘定低渗储层分类评价参数, 采用综合分类系数法完成低渗储层分类评价及有利区优选。研究认为L区目标层主要发育Ⅲ类储层, 其次是Ⅳ和Ⅴ类储层, Ⅰ、Ⅱ类储层不发育, Ⅲ类储层连片分布的区域为储层有利区。研究结果可以较好地指导储层开发有利区的优选。

关键词:低渗储层; 储层分类; 分类评价方法; 有利区优选

中图分类号: TE122.2 文献标志码: A

Classification and evaluation of low-permeability reservoirs in offshore L area and selection of favorable zones

ZHANG Xuemin¹, DAN Lingling¹, WEI Li¹, XU Jingkang², ZHU Jianying¹

(1. Ener Tech-Drilling & Production Co., CNOOC Energy Development Co. Ltd., Tianjin 300452, China;

2. College of Engineering, Yanbian University, Yangji 133002, China)

Abstract: The target layer of the offshore L area belongs to the offshore ultra-low permeability reservoir. To accurately classify and evaluate the reservoirs and guide the selection of favorable reservoir areas, based on the statistical reference of the existing classification and evaluation results of low-permeability reservoirs, combined with the characteristics of low-permeability reservoirs in the target area, the classification and evaluation parameters of low-permeability reservoirs were determined, and the comprehensive classification coefficient method was adopted to complete the classification and evaluation of low-permeability reservoirs and the selection of favorable areas. The results show that Class III reservoirs are mainly developed in the target layer of L area, followed by Class IV and V reservoirs, Class I and II reservoirs are not developed, and the contiguous distribution area of Class III reservoirs is a favorable area for reservoir development. The research results can better guide the selecting favorable areas for reservoir development.

Key words: low permeability reservoir; reservoir classification; classification evaluation method; favorable area optimization

引用格式: 张学敏, 但玲玲, 魏莉, 等. 海上L区低渗储层分类评价及有利区优选[J]. 复杂油气藏, 2024, 17(1): 44-49.

ZHANG Xuemin, DAN Lingling, WEI Li, et al. Classification and evaluation of low-permeability reservoirs in offshore L area and selection of favorable zones[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2024, 17(1): 44-49.

传统的中、高渗透储层进行分类评价时, 常用渗透率、孔隙度、产能等参数来表征, 如, 常采用储层质量指标 RQI :

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{\phi_e}}$$

式中, K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; ϕ_e 为有效孔隙度, 小数。

低渗透储层因渗透率低、原油存在受液固界面影响的边界层, 流动过程中存在非线性及启动压力梯度问题^[1], 储层分类评价方法不能完全套用中、高渗透储层分类评价方法。国内外许多学者已经做

过这方面的相关研究, 取得一些低渗储层分类评价认识: 杨正明等^[1]确定储量丰度、有效厚度、喉道半径、可动流体比率、启动压力梯度和有效驱动因子6个参数评价指标, 应用于大庆油田外围低渗透储层评价; 杨秋莲等^[2]针对超低渗储层提出有用孔隙度、

收稿日期: 2023-04-15; 改回日期: 2023-05-05。

第一作者简介: 张学敏(1972-), 本科, 高级工程师, 研究方向为油气藏精细描述及油气田开发评价。E-mail: zhangxm13@cnoc.com.cn。

基金项目: 中海油能源发展股份有限公司重大科技专项, 项目编号: HFZXKT-GJ2020-02-01。

主流喉道半径、可动流体饱和度、启动压力梯度4个分类评价参数形成四元分类标准;魏漪等^[3]应用模糊数学方法选出5个主控因子:主流喉道半径、油层厚度、含油饱和度、流动带指数、砂层厚度,用于长庆油田低渗透储层分类评价;齐桂雪等^[4]针对大庆外围低渗储层应用聚类分析方法确定可动流体饱和度、平均喉道半径、启动压力梯度3参数分类;张仲宏等^[5-8]在长庆、大庆外围、吉林和华北等油区大量岩心分析基础上提出采用主流喉道半径、可动流体百分数、拟启动压力梯度、原油黏度和黏土矿物含量5个评价参数;刘桂玲等^[9-10]选取三大类12个参数进行赋权重评价,其中,油藏参数指标包括储量、储量丰度、可采储量、油藏深埋、地面原油黏度,储层参数指标包括孔隙度、渗透率、喉道半径、可动流体百分数、启动压力梯度、敏感性,产能参数指标为千米井深日产油;贾培锋等^[11]优选平均喉道半径、可动流体百分数、脆性指数、地层压力系数、启动压力梯度、原油黏度6个参数将致密储层按综合分类系数分为4类;伍锐东等^[12]提出海上低渗气藏“渗透率、孔隙度、主流喉道半径、含气饱和度、可动水饱和度”5参数储层分类;牛涛等^[13]选用岩性、有效厚度、渗透率、孔隙度、排驱压力、中值半径、分选系数7种评价参数用于复杂岩性低渗储层综合评价;田坤等^[14]以特低渗致密储层渗透率为主线,开展其岩性、物性、启动压力梯度、覆压敏感性、孔喉中值半径等静态和可动流体饱和度、水驱油效率等动态指标研究,把延长油田特低渗致密储层划分为四类储层和非储层;李彦泽等^[15]选取储层品质因子(IRQ)、可动流体饱和度、主流喉道半径、排驱压力和分选系数作为主控因素,利用多元分析与灰色评价信息叠加进行储层定量综合评价。

海上L区W组有评价井1口,钻遇油层63 m,测试无自然产能,由于取心样品点少,深层地震资料分辨率差,无法支撑常规地质甜点认识及储层分类评价,亟需研究新的评价方法来完成目标层的分类评价工作,以指导储层开发有利区的优选。因此,本文在统计借鉴已有低渗储层分类评价成果基础上,结合海上L区W组低渗储层特征,厘定影响低渗储层分类评价的参数,并明确其分类界限,采用综合分类系数法实现低渗储层的分类评价及有利区优选,为目标层开发可行性评价提供有利指导。

1 工区地质特征

L区W组属于古近系地层,埋深3 318~4 013 m,其中目标层W5段为主要含油层段(表1),划分为11个小层。目标层属辫状河三角洲前缘沉积,天然裂缝不发育,为岩性-构造和构造-地层复合油藏类型,岩性以含砾中砂岩、细砂岩为主,岩石类型以岩屑长石砂岩为主,岩石颗粒分选差,磨圆以次棱一次圆为主,黏土矿物以高岭石、伊利石为主,其次是伊/蒙混层和绿泥石,其他成分相对较少。

表1 海上L区钻遇目标层简述

系	统	组	段	岩 性
古近系	始新统	E	E1	以砂泥岩互层为主,砂岩多为薄层
			E2	
			E3	
			E4	
		W	W1+2	中上部以大套灰褐色泥岩夹薄层细砂岩、泥质粉砂岩为主,下部为灰色凝灰岩、浅灰色凝灰质细砂岩夹薄层泥岩
			W3	
			W4	
			W5	
			W6	
前古近系			/	

基于取心段21个样品点实验统计,L区W组储层孔隙度9.7%~17.9%,平均12.8%,渗透率 $(0.2\sim 1.1)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均 $0.6\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,属低孔、特低渗储层。经过调研类比显示,L区W组储层特征及流体性质与大庆外围茂13区块扶余油层类似(表2)。

2 储层分类评价参数选取及计算

2.1 参数选取

通常低渗储层分类评价参数基于储层渗流、微观特征、产能因素等多维度进行选取,尤其储层微观孔隙结构特征对于低渗储层的渗流、产能及含油气性都具有至关重要的作用。基于文献调研统计显示(图1),喉道半径、可动流体百分数、启动压力梯度选取次数较多,其次是原油黏度、孔隙度、渗透率、黏土矿物含量、储量丰度、含油饱和度等。

L区W组储层渗透率与主流喉道半径关系(图2)、渗透率与启动压力梯度(图3)关系特征和大庆油田外围低渗储层特征类似。由于主流喉道半径、可动流体百分数、启动压力梯度均与渗透率具有相关性,故不将渗透率单独作为评价参数。基于L区

表2 L油田W组与大庆外围茂13区块扶余油层特征对比

区域	类别	孔隙度/ %	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	地面原油 密度/ (g·cm ⁻³)	地层原油 密度/ (g·cm ⁻³)	地面原油 黏度/ (mPa·s)	地层原油 黏度/ (mPa·s)	凝固点/ ℃	含蜡量/ %	含胶量/ %	体积 系数	原始 气油比/ (m ³ ·t ⁻¹)	原始 饱和 压力/ MPa
扶余 油层	范围	8.38~ 15.00	0.09~1.28	0.854 1~ 0.873 9	—	16.1~50.3	—	26~40	20.0~29.4	6.0~38.0	—	—	—
	平均	11.60	0.80	0.868 3	0.805 8	36.9	4.2	33	23.3	16.8	1.086	17.3	4.46
L油田 W组	范围	9.7~17.9 (样本数 21)	0.2~1.1 (样本数 21)	0.861~ 0.877	0.669~ 0.814	7.93~ 34.95	0.198~ 2.584	35.0~38.0	17.5~21.6	4.66~ 36.20	1.117~ 2.737	—	—
	平均	12.8	0.6	0.8745	0.745	20.58	1.04	35.5	19.98	24.42	1.443	62.0	9.39

地质油藏特征及区块类比分析,最终选取主流喉道半径、可动流体百分数、启动压力梯度、原油黏度、黏土矿物含量、储量丰度、含水饱和度作为储层分类评价参数。

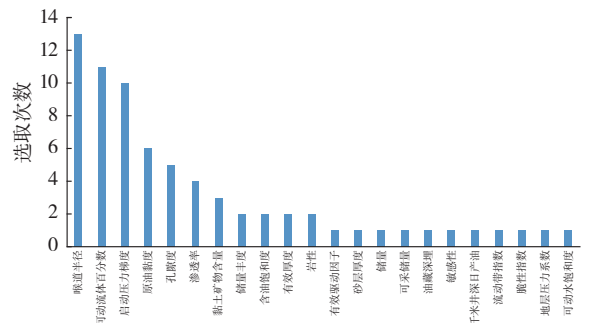


图1 调研统计评价参数选取次数直方分布

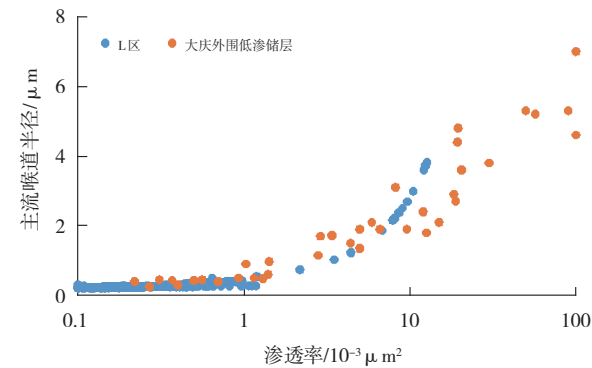


图2 主流喉道半径与渗透率关系

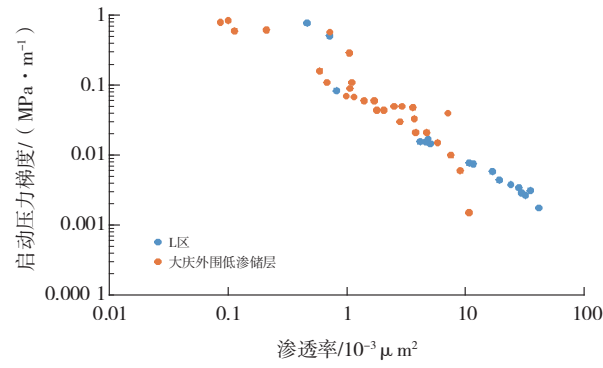


图3 启动压力梯度与渗透率关系

2.2 各参数计算

2.2.1 主流喉道半径

首先依据 Carman-Kozeny 公式计算出平均喉道半径,计算公式如下:

$$r = \sqrt{8K\tau^2/\phi}$$

式中, r 为喉道半径, μm ; K 为岩石渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; ϕ 为岩石孔隙度,%; τ 为迂曲度(孔道曲折程度),一般取值为1.2~2.5。

其次,根据压汞实验法测定的主流喉道半径与公式计算的平均喉道半径进行关系拟合(图4),得到主流喉道半径与平均喉道半径拟合公式。

最后,依据拟合公式在三维地质属性模型(孔隙度和渗透率模型)中运算,从而得到各小层的主流喉道半径平面分布。

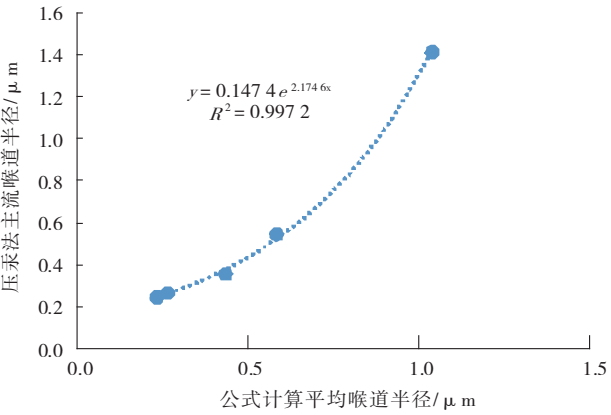


图4 主流喉道半径与平均喉道半径关系拟合

2.2.2 启动压力梯度

实验表明启动压力梯度与渗透率、原油黏度和含水饱和度具有相关性。启动压力梯度与渗透率呈反相关,渗透率越低,启动压力梯度越大;启动压力梯度与原油黏度正相关,黏度增加、启动压力梯度增大;启动压力与含水饱和度近线性反相关,含水饱和度越大,启动压力越小。

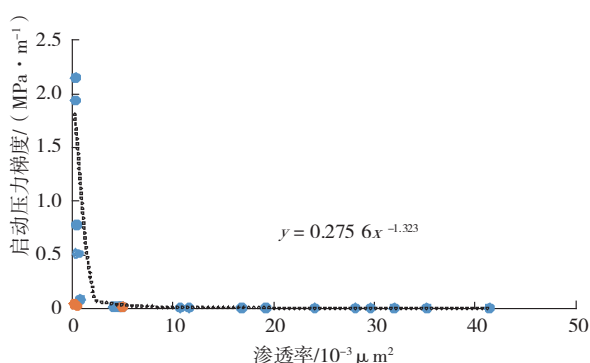


图5 启动压力梯度与渗透率关系拟合

由于原油黏度和含水饱和度两个参数单列,因此,仅采用启动压力梯度与渗透率拟合(图5)出L区启动压力梯度计算公式如下:

$$G = 0.2756K^{-1.323}$$

式中, G 为启动压力梯度,MPa/m; K 为储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

依据公式和渗透率三维模型可以计算出各小层的启动压力梯度平面分布。

2.2.3 可动流体百分数

可动流体百分数表征低渗透、特低渗透储层物性的重要参数,可动流体饱和度与驱油效率正相关。由于L区只有1口井的2个样品点,无法拟合出公式,故参考大庆外围低渗储层可动流体百分数关系进行趋势拟合(图6),得到L区W组可动流体百分数计算公式:

$$L = 31.136K^{0.3663}$$

式中, L 为可动流体百分数,%; K 为储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

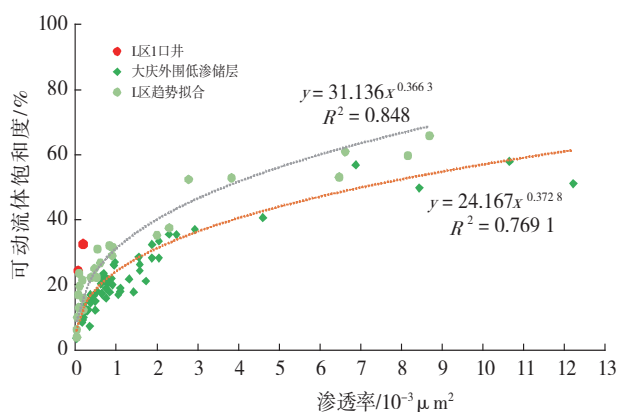


图6 可动流体百分数参数拟合

基于拟合公式和渗透率三维模型,可以计算出各小层的可动流体百分数平面分布状况。

2.2.4 储量丰度

基于地质模型计算出L区W组各小层的储量丰度值。

2.2.5 原油黏度

原油黏度值主要是基于原油样品的实验测定,各小层综合选取具有精准代表性的数值。

2.2.6 黏土矿物含量

黏土矿物含量的取值主要基于经过岩心分析化验数据标定的测井解释成果获取。

2.2.7 含水饱和度

基于含水饱和度模型计算出L区W组各小层含水饱和度值。

3 储层分类评价方法及分级

研究区仅有1口井,未投产、无产能作约束,评价参数权重无法准确标定,无法采用模糊综合评价法,故选择采用综合分类评价系数法进行低渗储层分类评价。

与储层分类评价正相关的参数为主流喉道半径、可动流体百分数、储量丰度,即主流喉道半径越大、可动流体百分数越高、储量丰度越高,区块开发效果越好;负相关的参数为启动压力梯度、原油黏度、含水饱和度和黏土矿物含量,即启动压力梯度、原油黏度、含水饱和度、黏土矿物含量越高,开发效果越差。基于此,综合分类系数计算公式为:

$$Feci = \ln [(r/r_s)(S_d/S_{ds})(P_F/P_{Fs}) / (G/G_s)(V_{sh}/V_{shs})(\mu_o/\mu_{os})(S_w/S_{ws})]$$

其中, $Feci$ 为综合分类系数,小数; r 为主流喉道半径, μm , r_s 为标定平均主流喉道半径, μm ; S_d 为可动流体百分数,%; S_{ds} 为标定平均可动流体百分数,%; P_F 为储量丰度, $10^4 \text{m}^3/\text{km}^2$; P_{Fs} 为标定储量丰度, $10^4 \text{m}^3/\text{km}^2$; G 为启动压力梯度,MPa/m; G_s 为标定平均启动压力梯度,MPa/m; V_{sh} 为黏土矿物含量,%; V_{shs} 为标定黏土矿物含量,%; μ_o 为原油黏度,mPa·s; μ_{os} 为标定原油黏度,mPa·s; S_w 为含水饱和度,%; S_{ws} 为标定含水饱和度,%。

储层分类评价参数标定平均值的设定,主要参考经过综合评价确定的L区储层评价参数分级界限(表3)。L区评价参数标定平均值为: r_s 为1.0 μm , S_{ds} 为35%, P_{Fs} 为50, G_s 为0.1, V_{shs} 为10%, μ_{os} 为10 mPa·s, S_{ws} 为30%。

基于 $Feci$ 计算数值并结合L区低渗储层特征,确定L区W组储层分类划分标准,将该区储层划分为5类,其中,I类储层 $Feci > 10$;II类储层 $Feci$ 介于7~10;III类储层 $Feci$ 介于4~7;IV类储层 $Feci$ 介于1~4;V类储层 $Feci < 1$ 。

表3 储层评价参数分级界限

分类	主流喉道半径/ μm	可动流体 百分数/%	启动压力梯度/ $(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	黏土矿物含量/ %	原油黏度/ $(\text{mPa}\cdot\text{s})$	储量丰度/ $(10^4\text{m}^3\cdot\text{km}^{-2})$	含水饱和度/ %
I类	>4	>65	<0.01	<5	<3	>100	<20
II类	2~4	50~65	0.01~0.1	5~10	3~10	80~100	20~30
III类	1~2	35~50	0.1~0.5	10~15	10~15	50~80	30~40
IV类	0.5~1	15~35	0.5~1	15~20	15~30	20~50	40~50
V类	<0.5	<15	>1	>20	>30	<20	>60

4 储层分类结果及有利区优选

利用三维地质模型(孔隙度模型、渗透率模型、含水饱和度模型)计算出的主流喉道半径、启动压力梯度、可动流体百分数、储量丰度、含水饱和度和标定的原油黏度和黏土矿物含量值,在三维地质模型中运算计算公式,从而得到小层斜体平面分布(图7)。依据L区W组储层斜体范围区间所对应的储层类别,获得小层的储层分类平面图(图8),图中可以明确显示出各类储层的分布状况(图8-图10)。

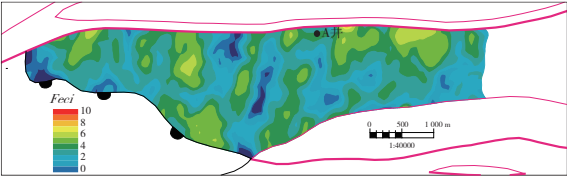


图7 L区W组W5-2小层斜体平面分布

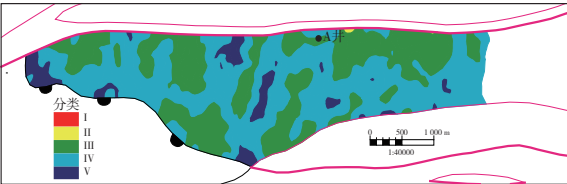


图8 L区W组W5-2小层储层分类

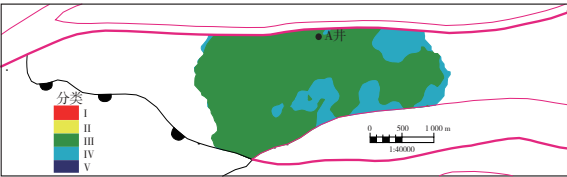


图9 L区W组W5-9小层储层分类

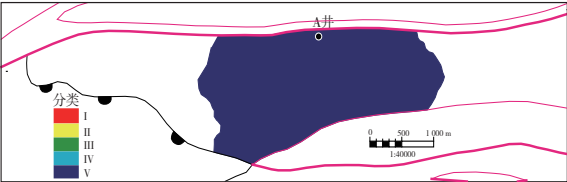


图10 L区W组W5-11小层储层分类

从小层储层分类平面分布情况来看,L区W组目标层段W5主要发育Ⅲ类储层,其次是IV和V类

储层,Ⅰ、Ⅱ类储层不发育。基于储层分类评价结果,明确该区Ⅲ类储层连片分布的区域为储层有利区。

5 结论

(1)基于经验成果及目标区低渗储层特征,厘定主流喉道半径、可动流体百分数、启动压力梯度、原油黏度、黏土矿物含量、储量丰度、含水饱和度为储层分类评价参数。

(2)明确储层分类评价参数计算方法,采用综合分类系数计算公式获得斜体值,依据五类储层分类划分标准,各小层储层分类平面图。

(3)L区目标层主要发育Ⅲ类储层,其次是IV和V类储层,Ⅰ、Ⅱ类储层不发育,Ⅲ类储层连片分布的区域为储层有利区。

参考文献:

[1] 杨正明,张英芝,郝明强,等.低渗透油田储层综合评价方法[J].石油学报,2006,27(2):64-67.
YANG Zhengming, ZHANG Yingzhi, HAO Mingqiang, et al. Comprehensive evaluation of reservoir in low-permeability oilfields [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27 (2): 64-67.

[2] 杨秋莲,李爱琴,孙燕妮,等.超低渗储层分类方法探讨[J].岩性油气藏,2007,19(4):51-56.
YANG Qiulian, LI Aiqin, SUN Yanni, et al. Classification method for extra-low permeability reservoirs [J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 51-56.

[3] 魏漪,赵国玺,周雯鸽,等.模糊数学方法在长庆油田低渗透储层综合评价中的应用[J].石油天然气学报, 2011,33(1):60-62,166.
WEI Yi, ZHAO Guoxi, ZHOU Wenge, et al. The application of fuzzy mathematic method in comprehensive evaluation for the low permeability reservoirs of Changqing Oilfield [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(1): 60-62,166.

- [4] 齐桂雪,刘凤贤,张继成.应用聚类分析方法对大庆外围低渗储层进行综合分类[C]//第九届中国不确定系统年会、第五届中国智能计算大会、第十三届中国青年信息与管理学者大会.南京:中国运筹学会不确定系统分会、中国运筹学会智能计算分会、南京理工大学,2011:160-167.
- QI Guixue, LIU Fengxian, ZHANG Jicheng. Application of cluster analysis method to comprehensive classification of low-permeability reservoirs in Daqing periphery [C]//The 9th China Annual Conference on Uncertain Systems, the 5th China Intelligent Computing Conference, and the 13th China Youth Conference on Information and Management Scholars. Nanjing: China Operations Research Society Uncertain Systems Branch, Intelligent Computing Branch of China Operations Research Society, Nanjing University of Science and Technology, 2011: 160-167.
- [5] 张仲宏,杨正明,刘先贵,等.低渗透油藏储层分级评价方法及应用[J].石油学报,2012,33(3):437-441.
- ZHANG Zhonghong, YANG Zhengming, LIU Xiangui, et al. A grading evaluation method for low-permeability reservoirs and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 437-441.
- [6] 张勇,贾成前,王海洋.低渗透油藏储层分级评价方法及应用[J].化工管理,2016(21):221.
- ZHANG Yong, JIA Chengqian, WANG Haiyang. Reservoir classification evaluation method and application of low permeability reservoir [J]. Chemical Enterprise Management, 2016(21): 221.
- [7] 鲍伟.低渗透油藏储层分级评价方法及应用[J].石化技术,2016,23(7):172.
- BAO Wei. Classification evaluation method and its application in low permeability reservoirs [J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(7): 172.
- [8] 冯焱.低渗透油藏储层分级评价方法及应用[J].化工管理,2017(20):87.
- FENG Yan. Reservoir classification evaluation method and application of low permeability reservoir [J]. Chemical Enterprise Management, 2017(20): 87.
- [9] 刘桂玲,刘辛,林式微.江苏油田低渗致密砂岩储层综合评价[J].复杂油气藏,2015,8(2):60-64.
- LIU Guiling, LIU Xin, LIN Shiwei. Comprehensive evaluation of low-permeability tight-sandstone reservoirs in Jiangsu Oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2015, 8(2): 60-64.
- [10] 伊振林,张雷.基于微观孔隙结构的特低渗储层分类评价方法——以大庆油田古龙南地区为例[J].断块油气田,2020,27(1):40-44.
- YI Zhenlin, ZHANG Lei. Classification of extra-low permeability reservoir based on microscopic pore structure: A case study of south Gulong area in Daqing Oilfield [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(1): 40-44.
- [11] 贾培锋,杨正明,肖前华,等.致密油藏储层综合评价新方法[J].特种油气藏,2015,22(4):33-36,152.
- JIA Peifeng, YANG Zhengming, XIAO Qianhua, et al. A new comprehensive evaluation method for tight reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(4): 33-36, 152.
- [12] 伍锐东,黄导武,蔡华,等.基于微观渗流特征的低渗气藏储层分类研究[J].海洋石油,2016,36(2):46-49.
- WU Ruidong, HUANG Daowu, CAI Hua, et al. Classification of gas reservoir with low permeability based on micro-flow characteristics [J]. Offshore Oil, 2016, 36(2): 46-49.
- [13] 牛涛,王晖,胡晓庆,等.基于复杂岩性识别的低渗储层综合分类评价[J].西南石油大学学报(自然科学版),2017,39(3):47-56.
- NIU Tao, WANG Hui, HU Xiaoqing, et al. Comprehensive classification and evaluation of low permeability reservoirs based on the identification of complex lithological characteristics [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2017, 39(3): 47-56.
- [14] 田坤,谢锐杰,王果寿,等.延长油田低渗致密储层分类研究[J].西部探矿工程,2018,30(1):130-132,136.
- TIAN Kun, XIE Ruijie, WANG Guoshou, et al. Study on classification of low permeability tight reservoir in Yanchang Oilfield [J]. West-China Exploration Engineering, 2018, 30(1): 130-132, 136.
- [15] 李彦泽,商琳,王群会,等.断陷盆地强非均质低渗-致密砂岩储层综合分类——以渤海湾盆地南堡凹陷为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(6):1830-1843.
- LI Yanze, SHANG Lin, WANG Qunhui, et al. Comprehensive classification of highly heterogeneous low permeability-tight sandstone reservoir in faulted basin: Taking Nanpu Sag of Bohai Bay Basin as an example [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(6): 1830-1843.

(编辑 刘义梅)