

70 nm 和 10 nm 的界限 (见图 3a), 可以将页岩油储集层相应分为 I 级、II 级、III 级和 IV 级 (见表 2)。同时利用水膜厚度法^[24], 结合研究区东营凹陷页岩的润湿性分析结果及埋深、温度和压力数据, 计算得到页岩及主要矿物的临界吸附水膜厚度为 5.39~8.55 nm (见表 3)。

众所周知, 当孔喉半径不大于吸附水膜厚度时, 孔喉完全为吸附水所填充, 没有油气渗流的空间; 因此, 此时页岩不可能成为有效的储集层, 相应地孔喉半径对应页岩的理论成储下限。鉴于油分子本身还有一定尺寸、微小孔喉对应巨大的毛管压力, 实际的下限应大于 8 nm。由此来看, 表 2 中的 IV 级储集层其实已非储集层, 而 I、II、III 级储集层可分别称为好、中、差储集层。但是, 孔喉半径并非容易获得的参数, 故难以推广应用。因此, 需要将其转换为其他较易获取、最好是能够通过测井资料求取的参数, 以利于推广应用。

图 3 为利用东营凹陷页岩油重点探井樊页 1 井、牛页 1 井和利页 1 井页岩油储集层实测数据, 绘制出的储集层渗透率与平均孔喉半径、储能评价参数 (孔隙度、渗透率和含油饱和度 3 者的乘积^[25]) 孔隙度之间的关系曲线, 可以看出, 渗透率与前两者在双对数坐标上具有良好的线性关系, 且不同类型储集层的样品点基本没有交叉, 这表明渗透率、储能评价参数也可以作为储集层分级评价的指标。渗透率的分级界限分别为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 储能评价参数的分级界限分别为 $500 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ 、 $150 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ 和 $10 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ (见表 2)。但是, 图 3c 显示孔隙度与渗透率的相关性很差, 并且不同类型储集层的样品点在孔隙度参数上高度交叉重叠, 表明此时孔隙度无法作为储集层分级评价的参数。如果页岩油储集层的分级评价标准与孔隙度相关联, 将更具推广应用意义。

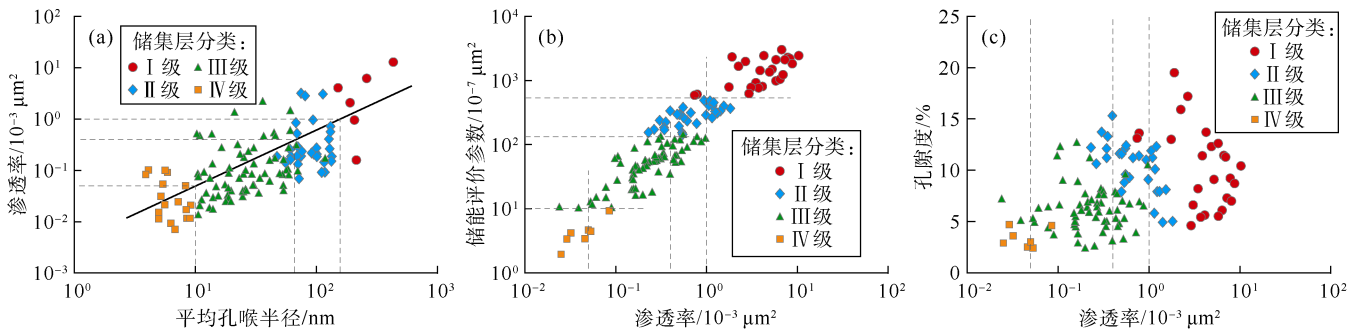


图 3 页岩油储集层渗透率与平均孔喉半径 (a)、储能评价参数 (b) 和孔隙度 (c) 关系

表 2 页岩油储集层分级评价标准

储集层 分级	储集空间 类型	平均孔喉 半径/nm	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	储能评价 参数/ $10^{-7} \mu\text{m}^2$
I 级	1 类	>150	>1	>500
II 级	2 类	150~70	1~0.4	500~150
III 级	3 类	10~70	0.40~0.05	150~10
IV 级	4 类	<10	<0.05	<10

表 3 东营凹陷页岩及单矿物临界水膜厚度

地层压力/ MPa	临界水膜厚度/nm					页岩
	石英	钾长石	方解石	白云石	黄铁矿	
30	8.38	8.55	8.07	8.00	7.21	7.97
40	6.09	6.20	5.91	5.89	5.39	5.85

2.3 储集层分级评价标准与孔隙度参数的关联

深入研究表明, 虽然研究区页岩油储集层的孔隙度、渗透率之间没有相关性, 但如果通过耦合储集层实测的孔隙度、渗透率参数, 可以利用储集层流动带指数 (FZI) 的累计密度分布及聚类分析结果, 将研究区的页岩油储集层划分为 5 类水力流动单元 (HFU₁—HFU₅), 同一水力流动单元的孔隙度、渗透率参数之间具有良好的相关关系 (见图 4)。

FZI 值的计算公式如下^[26]：

$$FZI = \frac{RQI}{PMR} \quad (1)$$

其中： $RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{\phi}}$

$$PMR = \frac{\phi}{1-\phi} \times 100\%$$

上述公式即为页岩油储集层分级评价标准推广应用提供了桥梁, 因为 FZI 值和孔隙度都可以利用测井资料方便求得, 并且测井计算值与实测值吻合度较好 (见图 5)。

3 储集层分级评价标准的应用

利用页岩油区丰富的测井资料和 BP 神经网络计算方法, 可以得到单井 FZI 和孔隙度剖面; 参照图 4a, 由 FZI 值可以划分出水力流动单元; 由同一流动单元内孔隙度-渗透率良好的指数关系 (见图 4b), 即可得到渗透率值; 对照表 2 的页岩油储集层分级评价标准, 即可以实现对页岩油储集层的分级评价。应用该方法,

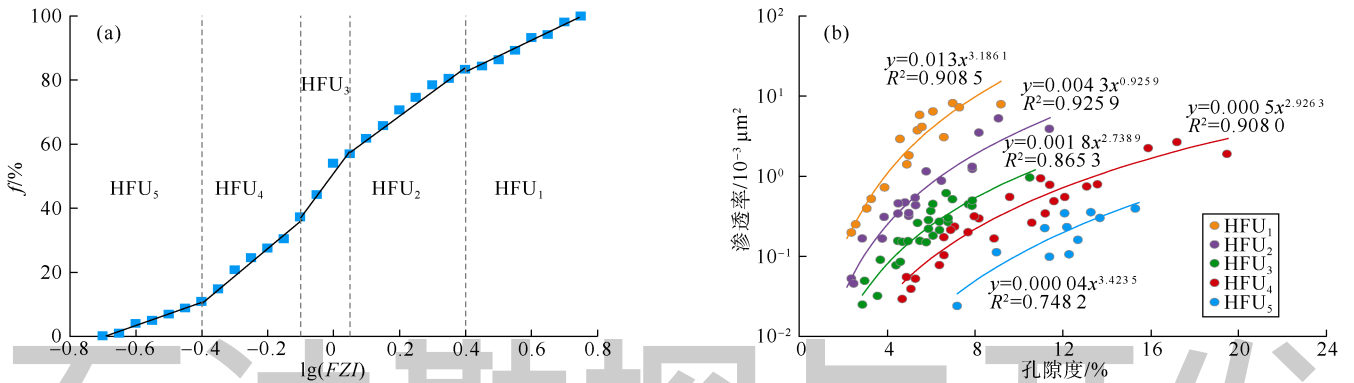


图4 研究区页岩油储集层水力流动单元划分 (a) 及不同水力流动单元的孔隙度-渗透率关系 (b)

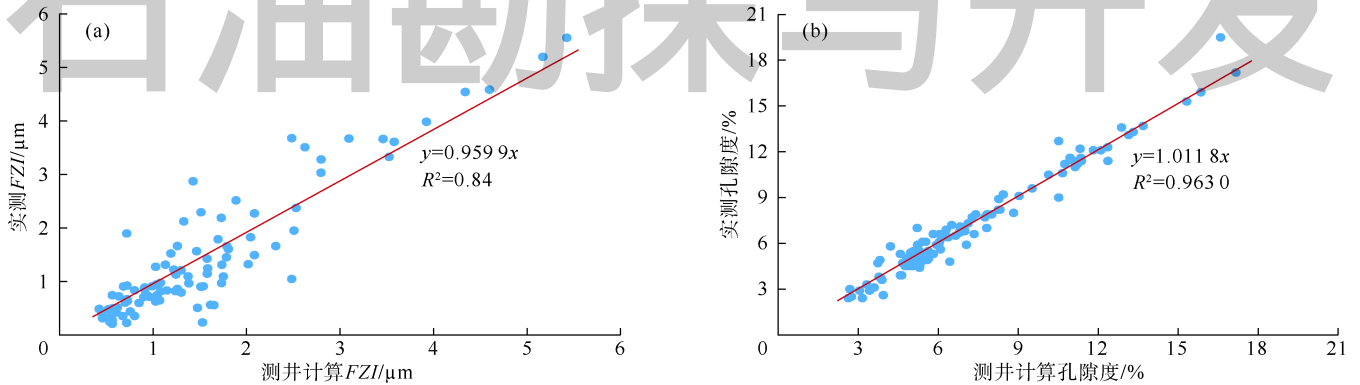


图5 利用测井资料计算的 FZI 值、孔隙度与实测值之间的关系 (以樊页 1 井和利页 1 井为例)

对东营凹陷 27 口井页岩油储集层进行了评价。图 6 以牛页 1 井为例^[27]，给出了按照上述方法得到的结果，可以看出，评价值与实测值吻合较好。图 7 给出了东营凹陷储集层分级评价的连井剖面，该剖面岩性主要为灰质泥岩、泥岩、油泥岩和油页岩，夹少量泥灰岩、泥质白云岩、白云岩、灰质白云岩和粉砂岩等薄夹层。由图 7 可见，梁 760 井、牛页 1 井的储集层较好，基本为 I 级储集层，而樊 162 井、纯 110 井的储集层较差，大多为 III 级及以下。由此可以评价有利页岩油储集层的剖面分布，当然也可由此评价有利储集层的平面分布。限于篇幅，本文没有给出有利储集层的平面分布图。

在测井计算过程中，对自然电位、井径、自然伽马、中子孔隙度、声波时差和密度原始测井曲线进行了归一化处理，归一化处理的计算公式如下：

$$X_i^* = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (4)$$

4 m 底部梯度电阻率和微梯度电阻率测井曲线归一化处理的计算公式如下：

$$X_i^* = \frac{\lg X_i - \lg X_{\min}}{\lg X_{\max} - \lg X_{\min}} \quad (5)$$

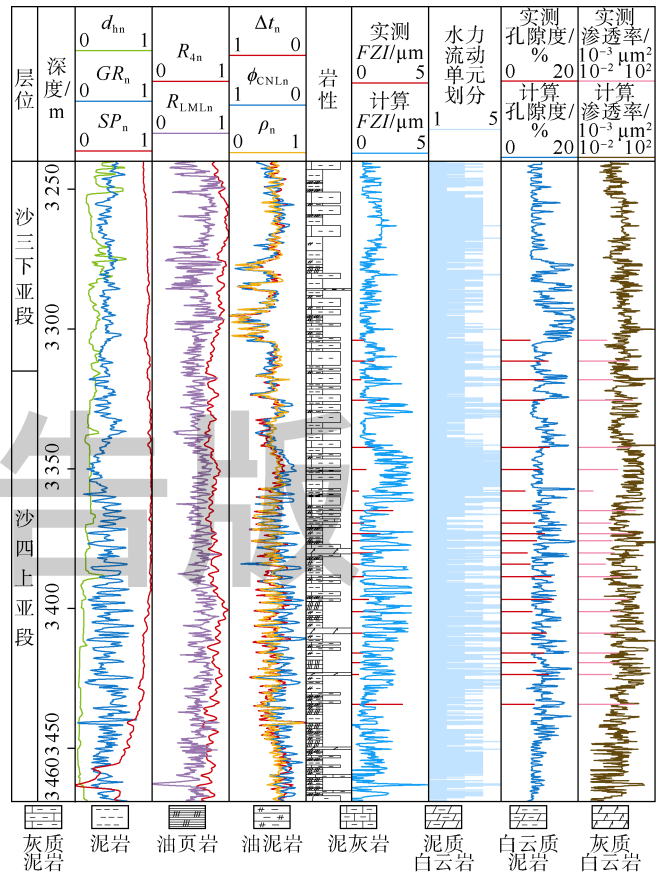


图6 牛页 1 井页岩油储集层 FZI、水力流动单元、孔隙度、渗透率评价剖面 (水力流动单元划分列中蓝色柱赋值 1—5，依次代表了 HFU₁—HFU₅ 水力流动单元)

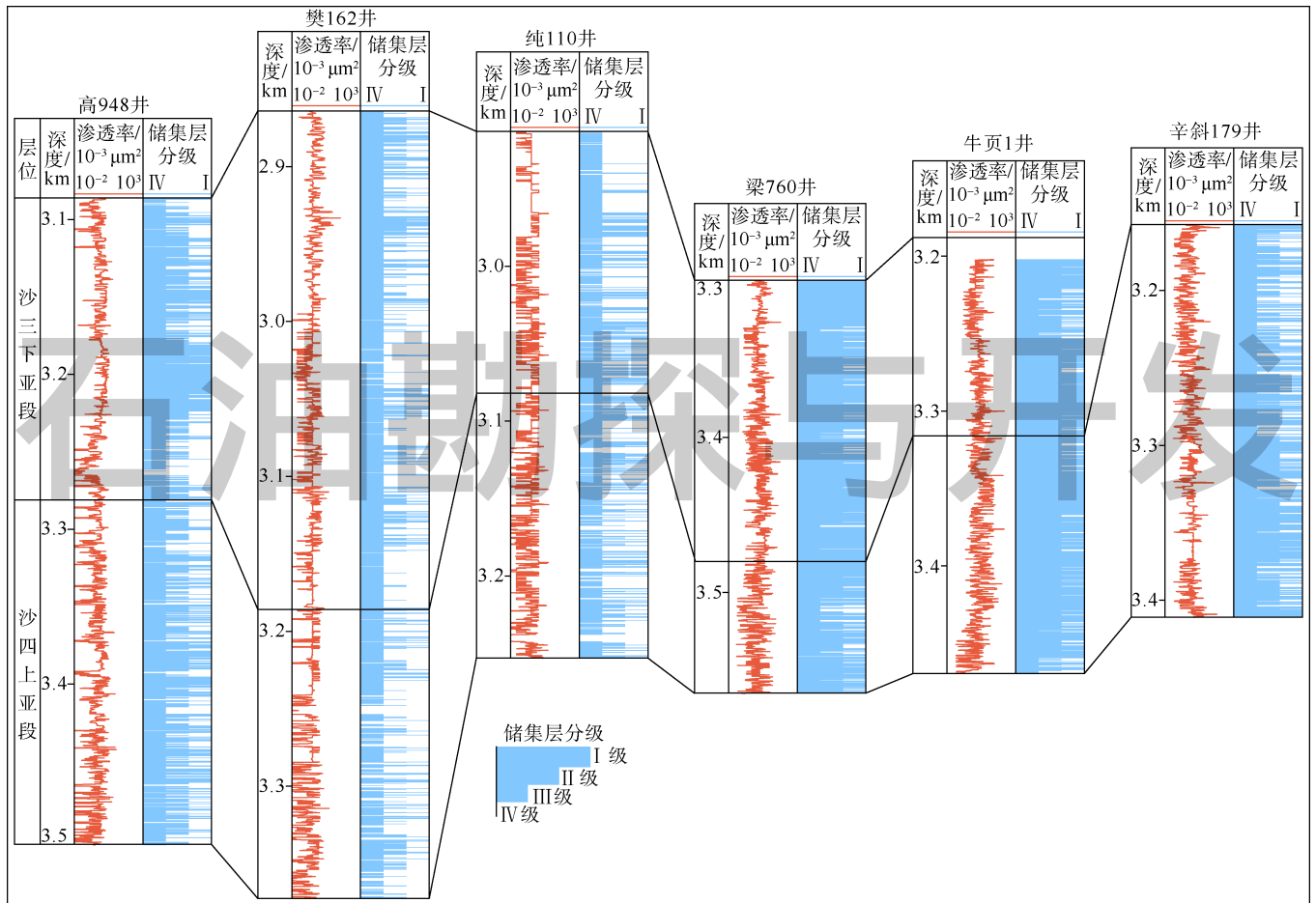


图7 东营凹陷储集层分级评价连井剖面

4 结论

依据高压压汞曲线的拐点及其分形特征，页岩油储集层的微观孔喉可以分为微孔（小于 25 nm）、小孔（25~100 nm）、中孔（100~1 000 nm）、大孔（大于 1 000 nm）。经典的 Hodot 分类和 IUPAC 分类可能并不适合于页岩油储集层。

依据页岩所含不同类型微观孔喉的数量可将其分为 I 级、II 级、III 级和 IV 级页岩油储集层，对应的平均孔喉半径分布范围分别为大于 150 nm、70~150 nm、10~70 nm 和小于 10 nm。其中孔喉平均半径 10 nm 为其成储下限，即 IV 级为非储集层；各级储集层相应的渗透率范围分别为大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $(0.4 \sim 1.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、 $(0.05 \sim 0.40) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；储能评价参数分级标准分别为 $500 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ 、 $(150 \sim 500) \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ 、 $(10 \sim 150) \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ 和小于 $10 \times 10^{-7} \mu\text{m}^2$ 。

同一水力流动单元内孔隙度、渗透率存在良好指数关系，由此可以利用测井资料评价储集层流动带指

数（FZI）、划分流动单元，将上述分级标准经测井资料推广应用到单井、连井及平面上。这使本文建立的标准具有可推广应用价值。在东营凹陷的初步应用表明，梁 760 井、牛页 1 井区的储集层类型很好，基本为 I 级储集层，而樊 162 井、纯 110 井的储集层较差，大多为 III 级及以下储集层，与实际情况相符。

其他盆地亦可借鉴本文的方法建立各自的分类、分级方案，鉴于湖相泥岩有一定共性，且本文所提出的方案是基于两个不同的盆地，在缺少相关资料的地区，可以直接借用本文的分类分级方案。

符号注释：

d_{hn} ——归一化后的井径测井，无因次； f ——累计密度分布，%； FZI ——储集层流动带指数，无因次； GR_n ——归一化后的自然伽马，无因次； K ——渗透率， $10^{-3} \mu\text{m}^2$ ； p_c ——毛管压力，MPa； PMR ——标准化孔隙度，%； R_{4n} ——归一化 4 m 底部梯度电阻率，无因次，无因次； R_{LMLn} ——归一化微梯度电阻率，无因次； RQI ——储集层品质指数，无量纲； S_{Hg} ——汞饱和度，%； SP_n ——归一化后的自然电位，无因次； X_i^* ——测井曲线归一化值； X_i ——原始测井值； X_{max} ——目的

层段测井曲线最大值; X_{\min} ——目的层段测井曲线最小值;
 ϕ ——孔隙度, %; ϕ_{CNLn} ——归一化补偿中子, 无因次;
 Δt_n ——归一化声波时差, 无因次; ρ_n ——归一化体积密度,
 无因次。

参考文献:

- [1] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 321-331.
 ZHANG Jinchuan, LIN Lamei, LI Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 321-331.
- [2] 卢双舫, 黄文彪, 陈方文, 等. 页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249-256.
 LU Shuangfang, HUANG Wenbiao, CHEN Fangwen, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249-256.
- [3] 卢双舫, 薛海涛, 王民, 等. 页岩油评价中的若干关键问题及研究趋势[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1309-1322.
 LU Shuangfang, XUE Haitao, WANG Min, et al. Several key issues and research trends in evaluation of shale oil[J]. Acta Petroli Sinica, 2016, 37(10): 1309-1322.
- [4] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
 ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [5] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 184-196.
 JIANG Zaixing, ZHANG Wenzhao, LIANG Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petroli Sinica, 2014, 35(1): 184-196.
- [6] 张林晔, 李钜源, 李政, 等. 北美页岩油气研究进展及对中国陆相页岩油气勘探的思考[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 700-711.
 ZHANG Linye, LI Juyuan, LI Zheng, et al. Advances in shale oil/gas research in North America and considerations on exploration for continental shale oil/gas in China[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(6): 700-711.
- [7] 卢双舫, 陈国辉, 王民, 等. 辽河坳陷大民屯凹陷沙河街组四段页岩油富集资源潜力评价[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 8-14.
 LU Shuangfang, CHEN Guohui, WANG Min, et al. Potential evaluation of enriched shale oil resource of Member 4 of the Shahejie Formation in the Damintun Sag, Liaohe Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 8-14.
- [8] 马永生, 冯建辉, 牟泽辉, 等. 中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 22-30.
 MA Yongsheng, FENG Jianhui, MU Zehui, et al. The potential and exploring progress of unconventional hydrocarbon resources in SINOPEC[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(6): 22-30.
- [9] 宋国奇, 张林晔, 卢双舫, 等. 页岩油资源评价技术方法及其应用[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 221-228.
 SONG Guoqi, ZHANG Linye, LU Shuangfang, et al. Resource evaluation method for shale oil and its application[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 221-228.
- [10] 张林晔, 李钜源, 李政, 等. 湖相页岩有机储集空间发育特点与成因机制[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2015, 40(11): 1824-1833.
 ZHANG Linye, LI Juyuan, LI Zheng, et al. Development characteristics and formation mechanism of intra-organic reservoir space in lacustrine shales[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(11): 1824-1833.
- [11] 张鹏飞, 卢双舫, 李文浩, 等. 江汉盆地新沟嘴组页岩油储层物性下限[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(1): 93-100.
 ZHANG Pengfei, LU Shuangfang, LI Wenhao, et al. Lower limits of porosity and permeability of shale oil reservoirs in the Xingouzui Formation, Jianghan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(1): 93-100.
- [12] 王伟明, 卢双舫, 田伟超, 等. 利用微观孔隙结构参数对辽河大民屯凹陷页岩储层分级评价[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(4): 12-19.
 WANG Weiming, LU Shuangfang, TIAN Weichao, et al. Liaohe Oilfield shale reservoir quality grading with micropore evaluation parameters in Damintun Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(4): 12-19.
- [13] 卢双舫, 张亚念, 李俊乾, 等. 纳米技术在非常规油气勘探开发中的应用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(1): 28-36.
 LU Shuangfang, ZHANG Yanian, LI Junqian, et al. Nanotechnology and its application in the exploration and development of unconventional oil and gas[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(1): 28-36.
- [14] HODOT B B. Outburst of Coal and Coalbed Gas(Chinese Translation) [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1966.
- [15] IUPAC. Manual of symbols and terminology[J]. Pure and Applied Chemistry, 1972, 31: 578.
- [16] 姚艳斌, 刘大锰, 黄文辉, 等. 两淮煤田煤储层孔-裂隙系统与煤层气产出性能研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 163-168.
 YAO Yanbin, LIU Dameng, HUANG Wenhui, et al. Research on the pore fractures system properties of coalbed methane reservoirs and recovery in Huainan and Huaibei coal fields[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 163-168.
- [17] 李俊乾, 姚艳斌, 蔡益栋, 等. 华北地区不同变质程度煤的物性特征及成因探讨[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(4): 111-115.
 LI Junqian, YAO Yanbin, CAI Yidong, et al. Discussion on coal physical properties and formation with different metamorphic degree in North China[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(4): 111-115.
- [18] XIONG J, LIU X J, LIANG L X. Experimental study on the pore structure characteristics of the Upper Ordovician Wufeng Formation shale in the southwest portion of the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 22: 530-539.
- [19] LI A, DING W L, HE J H, et al. Investigation of pore structure and fractal characteristics of organic-rich shale reservoirs: A case study of Lower Cambrian Qiongzhusi formation in Malong block of eastern Yunnan Province, South China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 70: 46-57.
- [20] ZHANG P F, LU S F, LI J Q, et al. Characterization of shale pore

- system: A case study of Paleogene Xin'gouzui Formation in the Jiangnan basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 79: 321-334.
- [21] WASHBURN E. The dynamics of capillary flow[J]. *Physical Review*, 1921, 17(3): 273-283.
- [22] LI J Q, LIU D M, YAO Y B, et al. Physical characterization of the pore-fracture system in coals, Northeastern China[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2013, 31(2): 267-286.
- [23] 郭春华, 周文, 林璠, 等. 页岩气储层毛管压力曲线分形特征[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(6): 773-777.
GUO Chunhua, ZHOU Wen, LIN Fan, et al. Fractal characteristics of capillary pressure curve in shale gas reservoir[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2014, 41(6): 773-777.
- [24] 王伟明, 卢双舫, 田伟超, 等. 吸附水膜厚度确定致密油储层物性下限新方法: 以辽河油田大民屯凹陷为例[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(1): 135-140.
WANG Weiming, LU Shuangfang, TIAN Weichao, et al. A new method to determine porosity and permeability cutoffs of tight oil reservoirs by using thickness of adsorption water film: A case study from the Damintun Sag, Liaohe oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(1): 135-140.
- [25] 王伟明, 卢双舫, 陈旋, 等. 致密砂岩气资源分级评价新方法: 以吐哈盆地地下侏罗统水西沟群为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(1): 60-67.
WANG Weiming, LU Shuangfang, CHEN Xuan, et al. A new method for grading and assessing the potential of tight sand gas resources: A case study of the Lower Jurassic Shuixigou Group in the Turpan-Hami Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(1): 60-67.
- [26] GHIASI-FREEZ J, KADKHODAIE-ILKHCHI A, ZIAII M. Improving the accuracy of flow units prediction through two committee machine models: An example from the South Pars Gas Field, Persian Gulf Basin, Iran[J]. *Computers & Geosciences*, 2012, 46(3): 10-23.
- [27] 张林晔, 包友书, 李钜源, 等. 湖相页岩油可动性: 以渤海湾盆地济阳拗陷东营凹陷为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(6): 641-649.
ZHANG Linye, BAO Youshu, LI Juyuan, et al. Movability of lacustrine shale oil: A case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(6): 641-649.

第一作者简介: 卢双舫(1962-), 男, 湖北天门人, 博士, 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院教授, 主要从事油气地质学和地球化学方面的研究工作。地址: 山东省青岛市, 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 邮政编码: 266580。E-mail: lushuangfang@qq.com

通讯作者简介: 李俊乾(1987-), 男, 河南商丘人, 博士, 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院讲师, 主要从事非常规油气地质学的研究。地址: 山东省青岛市, 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 邮编: 266580。E-mail: lijunqian1987@126.com

收稿日期: 2017-11-20 修回日期: 2017-12-29

(编辑 黄昌武)

预告版