

松辽盆地三肇凹陷致密储层地质评价

蒋瑞刚

大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆
Email: 362807298@qq.com

收稿日期: 2021年2月5日; 录用日期: 2021年3月18日; 发布日期: 2021年3月29日

摘要

致密油藏采用压裂方式投入开发后, 以孔隙结构为基础的致密储层分类评价标准不再适用。针对致密储层体积压裂或缝网压裂的开发特点, 在致密储层地质评价时采用脆性指数和单井控制储量两项参数评价储层, 并以投产连续生产两年的累积产油量检验该方法评价结果的准确性。根据两项评价参数, 把研究区致密储层分为三类, I类储层脆性指数和储层单井控制储量都高, II类储层脆性指数高、单井控制指数低或脆性指数低, 单井控制储量大, III类储层脆性指数和单井控制储量都低, 该分类标准符合率达到85%。研究区扶杨油层整体开发效果较差是由普通压裂的压裂工艺和致密储层的脆性指数较低共同决定的; 压裂开发的致密油藏单井产能受脆性指数和单井控制储量的共同控制, 两者具有互补的作用; 采用综合多项地质参数于一体的单井控制储量评价致密储层, 不仅实现了降维, 而且取得了较好的评价效果。

关键词

三肇凹陷, 扶杨油层, 致密油, 储层评价, 脆性指数, 压裂

Geological Evaluation of Tight Reservoirs in Sanzhao Sag, Songliao Basin

Ruigang Jiang

Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co. Ltd., Daqing Heilongjiang
Email: 362807298@qq.com

Received: Feb. 5th, 2021; accepted: Mar. 18th, 2021; published: Mar. 29th, 2021

Abstract

After a tight reservoir is developed by fracturing, the classification and evaluation criteria of tight reservoir based on pore structure are no longer applicable. In view of the development characteristics of volume fracturing or fracturing with fracture networks in tight reservoirs, brittleness index and single well controlled reserves are adopted to evaluate the reservoir in geological evaluation of tight reservoirs, and the accuracy of the evaluation results of this method is tested by cumulative oil production after two years of continuous production. According to the evaluation of two parameters, the dense reservoir in the study area is divided into three categories, I reservoir: high brittleness index and single well controlled reserves, II reservoir: high brittleness index and low single well controlled reserves, or low brittleness index and high single well controlled reserves, III reservoir: low brittleness index and single well controlled reserves. The classification standards coincidence rate reaches 85%. The poor overall development effect of Fuyu and Yangdachengzi reservoir in the study area is determined by the common fracturing technology and the low brittleness index of tight reservoir. Single well productivity of fractured tight reservoir is controlled by brittleness index and controlled reserves of single well and the two factors have complementary effect. The single well controlled reserves evaluation of tight reservoir with integrated multiple geological parameters not only realizes dimension reduction, but also obtains good evaluation effect.

Keywords

Sanzhao Sag, Fuyu and Yangdachengzi Oil Layer, Tight Oil, Reservoir Evaluation, Brittleness Index, Fracturing

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

致密储层的成藏受圈闭和水动力条件控制不明显，平面上呈现大面积连片分布，因此优选甜点作为致密油藏的优先开发区[1]。当前，针对致密储层地质评价往往围绕孔隙结构、岩性精细描述、粘土矿物含量、流体性质等展开，并取得了大量的研究成果[2]-[7]。但多参数致密储层评价往往导致参数间互相矛盾，同时在实际开发过程中，为了提高致密储层的渗流能力，一般对油井进行压裂增产措施，原始的孔隙结构发生变化，导致基于孔隙结构等参数建立的致密储层评价标准适用性变差。大庆长垣东部扶杨油

层致密油探明未开发储量达 2.2 亿吨，是大庆油田未来重要的产量接替区。本文从压裂开发的地质条件入手，突破传统孔喉特性、流固耦合、塑性矿物含量等多参数致密储层地质评价方法，探索单井控制储量和脆性指数双参数对单井产能的控制作用，以供大庆长垣东部扶杨油层致密油的有效动用参考。

2. 地质概况

研究区位于大庆长垣东部三肇凹陷升平鼻状构造南端，是扶杨油层的开发试验区(图 1)，三肇凹陷扶杨油层具有致密油形成与聚集的得天独厚的地质条件[8]。泉头组三、四段沉积时期，气候为半干旱向潮湿的过渡阶段，研究区受北部拜泉 - 明水沉积体系、讷河 - 依安沉积体系和南部沉积体系的共同影响，沉积环境为三角洲平原和三角洲前缘，发育的砂体有分流河道、水下分流河道、前缘席状砂等，砂岩厚度平均 2.0 m。根据预探井和评价井岩心物性分析资料，扶杨油层孔隙度 5.5%~17.5%，中值 11.3%，渗透率 0.01~11.2 mD，中值 0.6 mD，属于典型的致密储层。

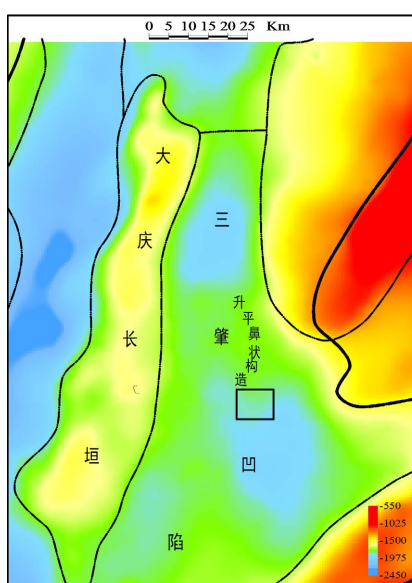


Figure 1. Top structure and study area location of Sanzhao sag
图 1. 三肇凹陷顶面构造及研究区位置

脆性指数 %	裂缝形态	裂缝形态示意图
70	缝网	
60	缝网	
50	缝网与多缝过度	
40	缝网与多缝过度	
30	多缝	
20	两翼对称	
10	两翼对称	

Figure 2. Relationship between fracture morphology and brittleness index
图 2. 裂缝形态与脆性指数关系示意图

3. 致密油藏产能影响因素

对于非压裂开发的致密气藏，产能受致密储层的泥质含量、孔隙度、渗透率、含油饱和度、有效厚度以及天然微裂缝的影响[9]。对于压裂开发的致密油藏，储层原始的孔隙结构和渗透性已经发生变化，因此采用脆性指数和单井控制储量衡量储层好坏。致密砂岩储层的脆性研究往往借鉴页岩脆性的研究成果，并取得了较好的效果[10] [11]。Richman 在北美 Barnett 页岩压裂现场试验中发现，岩石的可压性可用脆性指数表征，岩石脆性指数高，岩石越易于压裂，压后越易于形成复杂的裂缝(图 2)，单井产能越高[12] [13] [14] [15]，同时裂缝形态还受压裂工艺的影响，常规压裂技术只能形成水平的对称双翼裂缝，无法改善垂向渗流能力[16]。基于杨氏模量和泊松比的脆性指数计算模型：

$$BI = \frac{E + u}{2} \quad (\text{式 1})$$

$$E = 100 \times \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (\text{式 2})$$

$$u = 100 \times \frac{u - u_{\max}}{u_{\min} - u_{\max}} \quad (\text{式 3})$$

$$E = \frac{\rho \times \frac{1}{DTS^2} \times \left(\frac{3}{AC^2} - \frac{4}{DTS^2} \right)}{\frac{1}{AC^2} - \frac{1}{DTS^2}} \quad (\text{式 4})$$

$$u = \frac{\frac{1}{2 \times AC^2} - \frac{1}{DTS^2}}{\frac{1}{AC^2} - \frac{1}{DTS^2}} \quad (\text{式 5})$$

式中， BI ——脆性指数； E ——杨氏模量； u ——泊松比； ρ ——密度测井， g/cm^3 ； DTS ——横波测井， us/m ； AC ——纵波测井， us/m 。

杨氏模量是指岩石破裂后，岩石维持其形成的裂缝的能力，泊松比是指岩石受到力的作用时，其抵抗被破坏的能力。脆性指数大的页岩具有较大的杨氏模量和较小的泊松比，脆性较小的页岩一般具有较小的杨氏模量和较大的泊松比[17]。

3.1. 致密储层脆性指数

通过岩心试验的方法获得脆性指数成本昂贵，不切实际，目前常用岩石力学参数法和脆性矿物表达法获得脆性指数，受岩矿鉴定数据的限制，本文采用岩石力学参数法获得脆性指数，即 Richman 模型。

根据 Richman 模型可知，计算致密储层脆性指数需要用的测井数据有纵波速度、横波速度和密度测井。研究区密度测井不全，只有 20 口井有密度测井，横波时差测井完全没有，鉴于研究区的实际情况，需要通过其他测井数据计算出密度数据和横波时差数据。

岩石的密度受孔隙度和矿物成分的控制，因此选择能反映孔隙和岩矿特征的测井纵波声波时差、自然伽马、自然电位和深侧向电阻率线性拟合密度数据。由于测井仪器、测井环境等的差异，选择砂岩发育最差的 FII3 为标准层(图 3)，选择研究区中部的两口井为标准井，对全区测井曲线进行直方图法标准化处理。以其中 10 口井作为拟合运算数井，剩余的 10 口井作为后验井，后验井表明拟合效果很好，绝对误差平均 0.002，相对误差平均 2.5%。拟合公式如下：

$$DEN = -0.00198 * AC + 0.001376 * GR + 0.00071 * SP - 0.00185 * RD + 2.876163 \quad (\text{式 } 6)$$

式中, DEN ——密度; AC ——纵波时差; GR ——自然伽马; SP ——自然电位; RD ——深侧向电阻率。

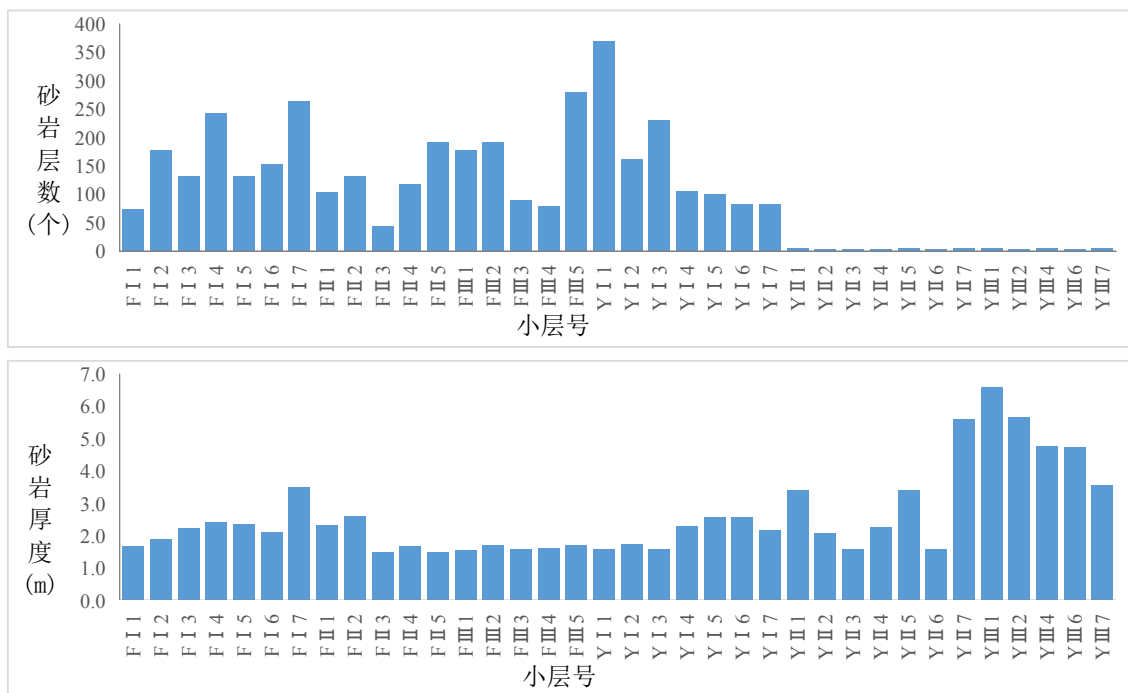


Figure 3. Histogram of sandstone layers and average single layer sandstone thickness
图 3. 砂岩层数和平均单层砂岩厚度直方图

横波时差出现在声波全波列测井中, 如长源距声波测井、阵列声波测井、交叉偶极子阵列声波测井等, 本文采用肇平 8 井的正交偶极子阵列声波测井(XMAC)中的横波时差, 通过反映孔隙和岩矿特征的横波时差、自然伽马和密度测井进行线性拟合, 以水平段(扶余油层)前半段作为拟合数据, 后半段作为后验数据, 后验数据表明拟合效果很好, 绝对误差平均-2.1, 相对误差平均 1.5%。拟合公式如下:

$$DTS = 1.145215 * AC + 60.49469 * V_{sh} + 28.45389 * DEN - 64.8059 \quad (\text{式 } 7)$$

$$V_{sh} = \frac{GR - GR_{mix}}{GR_{max} - GR_{min}} \quad (\text{式 } 8)$$

式中, DTS ——横波时差; AC ——纵波时差; V_{sh} ——泥质含量; DEN ——密度。

最后把纵波声波时差、横波声波时差和密度带入 Richman 公式, 即可计算出研究区各井扶余油层的脆性指数, 单井脆性指数采用砂岩厚度权衡法。

3.2. 单井控制储量

单井控制储量是油井产能的物质基础, 它受含油面积、有效厚度、有效孔隙度的控制, 通过单井控制储量这一参数, 综合起了以往致密储层评价时采用的有效厚度、有效孔隙度等参数, 不仅达到降维的目的, 而且更综合反映各参数间的互补作用。

结合注采井间流线分布[18](图 4), 采用龟背图法圈定含油面积, 具体圈定原则是: 以油井为中心, 向四周扩展一个开发井距, 如果一个开发井距内有断层, 则以断层作为边界; 如果一个开发井距内有水井, 则以水井作为边界; 如果一个开发井距内有别的油井, 则以井距之半作为边界(图 5)。

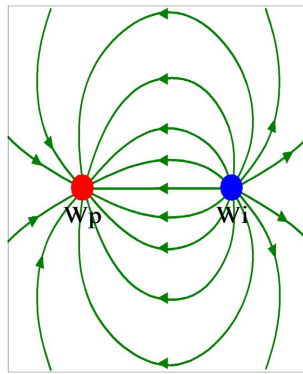


Figure 4. Streamline distribution between injection and production wells
图 4. 注采井间流线分布图

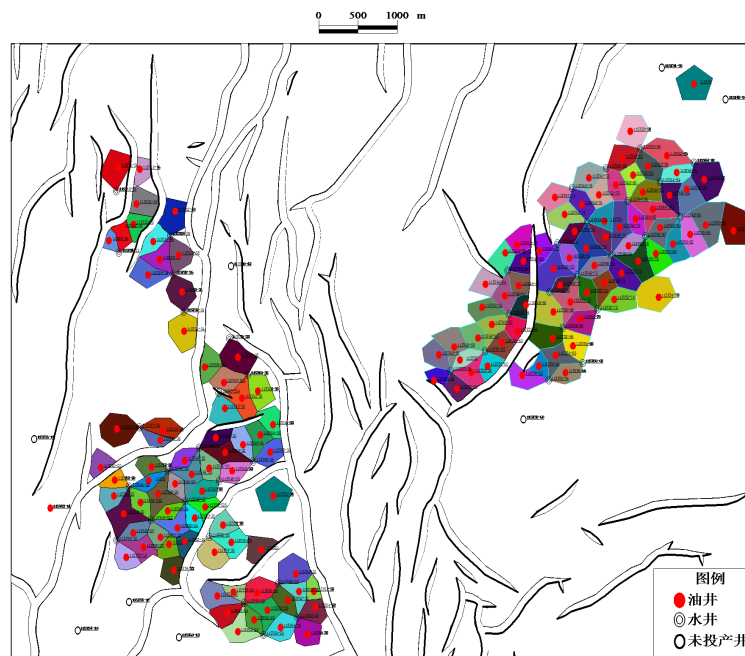


Figure 5. Turtle back of Fuyang reservoir
图 5. 扶杨油层龟背图

有效厚度采用等值线面积权衡法，有效孔隙度采用有效厚度权衡法，原始含油饱和度采用单位有效孔隙体积权衡法[19]，最后用容积法计算单井控制储量[20] (表 1)。

Table 1. Parameter calculation of single well controlled reserves
表 1. 单井控制储量参数计算表

有效厚度	
$H_i = \frac{A_j \times H_j}{A_i}$	(式 9)
<p>H_i——第 i 口井权衡有效厚度； H_j——等值线有效厚度； A_j——等值线有效厚度为 H_j 的面积； A_i——第 i 口井的含油面积</p>	

Continued

有效孔隙度

$$\phi_i = \frac{h_j \times \phi_j}{h_i} \tag{式 10}$$

ϕ_i ——第 i 口井的权衡厚度; h_j ——第 j 号层有效厚度;

ϕ_j ——第 j 号层有效孔隙度;

h_i ——第 i 口井有效厚度

原始含油饱和度

$$S_{oi} = \frac{h_j \times \phi_j \times S_{oj}}{\sum (h_j \times \phi_j)} \tag{式 11}$$

S_{oi} ——第 i 口井权衡原始含油饱和度;

h_j ——第 j 号层有效厚度;

ϕ_j ——第 j 号层有效孔隙度;

S_{oj} ——第 j 号层原始含油饱和度

4. 致密储层综合地质评价

以油井产能为中心, 分类评价致密储层。研究区部分井是葡扶杨油层合采井, 为了提高研究结果的准确性, 剔除这部分井。由于压裂开发的致密油藏, 单井日产下降快(图 6), 所以采用油井压裂投产后连续生产两年的累积产油量来衡量致密储层的好差, 基于两点考虑, 一是连续生产两年油井单井产量趋于稳定, 二是注水尚未受效, 规避开发因素对产量的影响。根据各井连续生产两年累积产油量的累积频率可以把累积产油量分为四段, 即<500, 500~1050, 1050~1500, >1500, 由于第四段井数太少, 所以把第三段和第四段合并, 这样累积产油量分为三段, 相应的致密储层类别也分为三类, 即 I 类、II 类、III 类(图 7)。

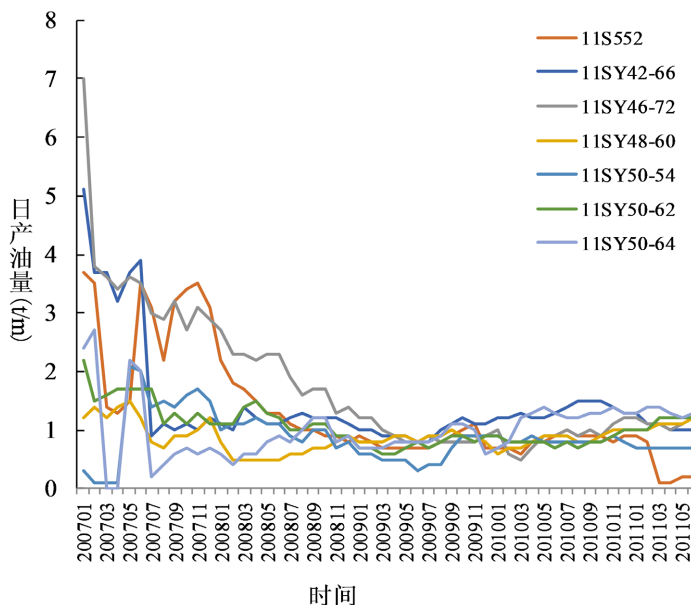


Figure 6. Daily production curve of some oil wells in Fuyang reservoir
图 6. 扶杨油层部分油井日产曲线

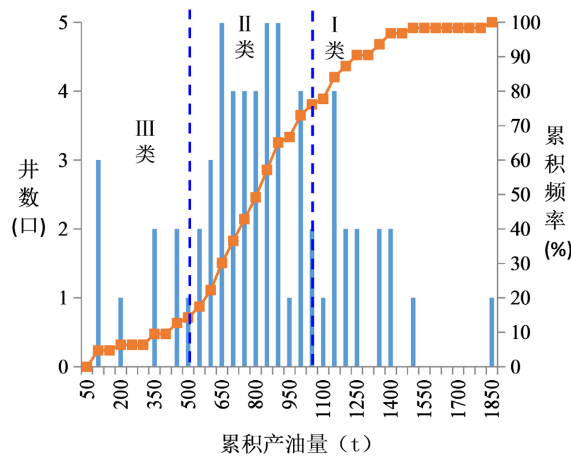


Figure 7. Histogram of cumulative oil production of oil wells in Fuyang reservoir
图 7. 扶杨油层油井累积产油量直方图

结合单井控制储量、脆性指数和储层类别，可知三类储层的单井控制储量和脆性指数标准(表 2)。I 类储层单井控制储量和脆性指数都高，III 类储层单井控制储量和脆性指数都低，II 类储层单井控制储量高、脆性指数低或单井控制储量低、脆性指数高，说明单井控制储量与脆性指数具有互补性，该分类标准的符合率达到 85% (图 8)。

Table 2. Comprehensive geological evaluation criteria of reservoir
表 2. 储层综合地质评价标准表

储层类别	累积产油量(t)	平均单井日产量(t/d)	单井控制储量(10 ⁴ m ³)	脆性指数(%)
I 类	>1050	>1.44	>5.18	>30
II 类	500~1050	0.69~1.44	>5.18	<30
III 类	<500	<0.69	<5.18	>30

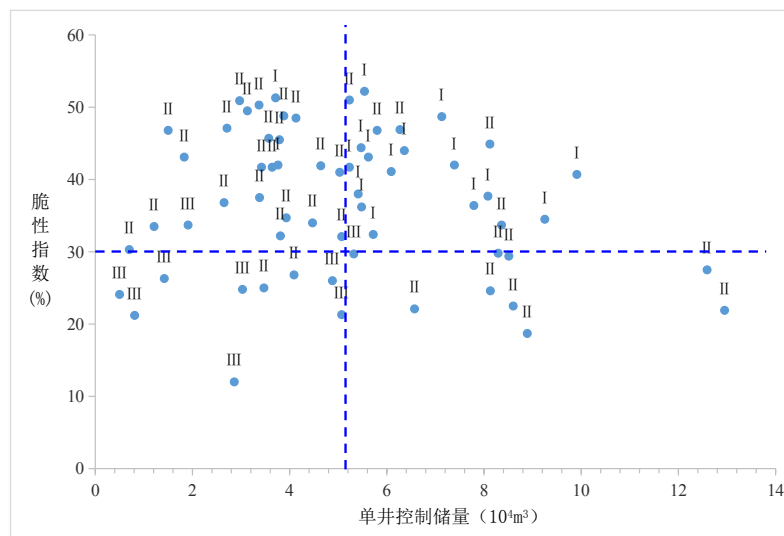


Figure 8. Scatter diagram of single well controlled reserves and brittleness index
图 8. 油层单井控制储量与脆性指数散点图

5. 结论

1) 升平鼻状构造扶杨油层整体开发效果较差是由普通压裂的压裂工艺和扶杨油层脆性指数较小的特点共同决定的, 两者共同作用的结果是压裂只能形成两翼对称的多缝, 不能形成体积缝, 无法在垂向上改善致密储层的渗透性。

2) 对于压裂开发的致密油藏, 油井产能受单井控制储量和脆性指数的共同控制, 以油井产能为致密储层的根本评价参数, 以单井控制储量和脆性指数为地质评价参数, 把致密储层分为 I、II、III 类储层, 单井控制储量与脆性指数具有互补性。

3) 在致密储层评价中, 首次采用单井控制储量评价参数, 不仅实现了评价参数的降维, 而且评价结果较好。

参考文献

- [1] 崔宝文, 林铁锋, 董万百, 等. 松辽盆地北部致密油水平井技术及勘探实践[J]. 大庆石油地质与开发, 2014, 33(5): 16-22.
- [2] 朱如凯, 吴松涛, 苏玲, 等. 中国致密储层孔隙结构表征需注意的问题及未来发展方向[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1123-1137.
- [3] 张居和, 张博为, 冯子辉, 等. 致密储层岩性精准评价及毫米级样品油源精细对比——以松辽盆地北部 QP1 井为例[J]. 地质学报, 2020, 94(5): 1538-1550.
- [4] 朱筱敏, 潘荣, 朱世发, 等. 致密储层研究进展和热点问题分析[J]. 地学前缘, 2018, 25(2): 141-146.
- [5] 张鹏, 张金功, 霍苗, 等. 致密储油层综合分类评价定量方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(2): 13-19.
- [6] 彭攀, 宁正福, 祁丽莎, 等. 致密储层孔隙结构研究方法概述[J]. 油气藏评价与开发, 2014, 4(1): 26-32.
- [7] 杨海博, 武云云. 致密储层岩石的微观结构和力学性质试验分析[J]. 复杂油气藏, 2011, 4(3): 10-15.
- [8] 林铁锋, 康德江. 松辽盆地三肇凹陷扶余油层致密储层分类精细评价[J]. 石油试验地质, 2017, 39(5): 686-694.
- [9] 张筠, 葛祥, 王志文. 洛带气田遂宁组致密储层的快速产能评价[J]. 测井技术, 2007, 31(4): 342-347.
- [10] 马旭, 郝瑞芬, 来轩昂, 等. 苏里格气田致密砂岩气藏水平井体积压裂矿场试验[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 742-747.
- [11] 道涵, 张兵, 何举涛, 等. 鄂尔多斯长 7 致密砂岩储层体积压裂可行性评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(1): 52-55.
- [12] 袁菁华. 松辽盆地北部致密油体积压裂裂缝形成机理及控制方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(2): 167-170.
- [13] Rickman, R., Mullen, M., Petre, E., *et al.* (2010) A Practical Use of Shale Petrophysics for Stimulation Design Optimization: All Shale Plays Are Not Clones of the Barnett Shale. Paper Number: SPE-115258-MS.
- [14] 李文阳, 邹洪岚. 从工程技术角度浅析页岩气的开采[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1218-1224.
- [15] 娄娜, 赵天琦, 张雁. 齐家油田致密储层脆性指数计算方法研究[J]. 中州煤炭, 2016, (6): 140-144.
- [16] 彭娇. 影响致密油层缝网压裂储层改造体积的主要因素研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2016.
- [17] Grieser, B. and Bray, J. (2007) Identification of Production Potential in Unconventional Reservoirs. Paper Number: SPE-106623-MS. <https://doi.org/10.2118/106623-MS>
- [18] 苏玉亮, 任龙, 赵广渊, 等. 低渗透油藏考虑压裂的合理注采井距研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 36(6): 72-79.
- [19] 刘吉余, 吴错, 甘森林, 等. 不同井网密度地质储量分布特征研究[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(21): 5168-5171.
- [20] 全国国土资源标准化技术委员会. DZ/T 0217-2005 石油天然气储量估算规范[S]. 北京: 石油工业出版社, 2005.