



湖相泥页岩基质储层直井压裂选层方法研究 ——以松辽盆地三肇凹陷松页油 3 井为例

黄一鸣,肖 飞,杨建国,李士超,李 昂,姚玉来,张丽艳

中国地质调查局 沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034

摘 要: 湖相泥页岩基质储层是中国页岩油赋存的主要载体,相对于夹层型和裂缝型储层更难被压裂改造和实现工业开发,因而压裂层位的选择至关重要。本文以松辽盆地三肇凹陷松页油 3 井为例,建立了一套湖相泥页岩基质储层直井压裂选层方法。通过录井、测井解释优选出青山口组一段中的 I 类页岩油层,对 I 类页岩油层的电性、物性、含油气性、烃源岩性、脆性、可压性 6 项指标进行综合分析,基于上述 6 项指标,利用层次分析法对所有 I 类页岩油层进行综合排序,确定了 27、25 和 23 号层为最有利页岩油层。松页油 3 井针对上述页岩油层进行了压裂试油,实现了三肇凹陷页岩油工业油流突破,证实选层方法可行有效,可推广应用于湖相基质型页岩油的甜点层优选和水平井部署。

关键词: 压裂;层次分析法;页岩油;基质储层;湖相泥页岩;青山口组;松辽盆地

FRACTURING LAYER SELECTION FOR VERTICAL WELL IN LACUSTRINE SHALE MATRIX RESERVOIR: A Case Study of SYY3 Well in Sanzhao Sag of Songliao Basin

HUANG Yi-ming, XIAO Fei, YANG Jian-guo, LI Shi-chao, LI Ang, YAO Yu-lai, ZHANG Li-yan

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The lacustrine shale matrix reservoir is the main carrier for shale oil in China, but it is more difficult for fracturing reformation and industrial development compared with interlayered and fractured reservoirs. Therefore, the selection of fracturing layers is of vital importance. Taking the SYY3 well in Sanzhao sag of Songliao Basin as an example, the paper establishes a set of fracturing layer selection method for vertical wells in lacustrine shale matrix reservoir. First, the Type I shale oil reservoir in the 1st member of Qingshankou Formation in SYY3 well is optimized by well logging and interpretation data. Then 6 indicators including electrical property, physical property, oil-gas possibility, source rock lithology, brittleness and fracability of Type I shale oil reservoir are comprehensively analyzed. Finally, the comprehensive ranking of Type I shale oil reservoir is conducted by analytic hierarchy process based on the above 6 indicators, and Nos. 27, 25 and 23 layers are determined as the most favorable shale oil reservoirs. Fracturing and oil testing of the above shale oil reservoirs are performed in SYY3 well, which has achieved a breakthrough in the industrial oil flow of shale oil in Sanzhao sag. It is proved that the method is feasible and effective, and can be applied

收稿日期:2021-03-16;修回日期:2021-04-21. 编辑:黄欣.

基金项目:中国地质调查局项目“松辽盆地北部页岩油战略调查”(DD20190114);“大庆齐家-古龙地区页岩油气战略调查与评价”(DD20179613).

作者简介:黄一鸣(1994—),男,硕士,主要从事页岩油调查与石油地质研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//496934556@qq.com

通信作者:肖飞(1987—),男,博士,高级工程师,主要从事页岩油调查与油气地球化学研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//xiaof@mail.cgs.gov.cn

to the optimization of sweet spot layer and horizontal well deployment of lacustrine matrix shale oil.

Key words: fracturing; analytic hierarchy process; shale oil; matrix reservoir; lacustrine shale; Qingshankou Formation; Songliao Basin

0 引言

页岩油是指呈游离态、吸附态或溶解态赋存于泥页岩层系中的液态烃类资源. 泥页岩层系包括泥页岩地层中可能夹有的致密砂岩、碳酸盐岩、甚至火山岩等薄层^[1-2],按照储集空间类型可分为裂缝型、夹层型和基质型三大类^[3-4]. 世界页岩油资源主要分布在俄罗斯、美国和中国,其中美国通过页岩油革命,已率先实现页岩油商业开发^[5-6]. 中国页岩油资源也十分丰富,

但与美国页岩油主要分布于海相盆地、储层类型以裂缝型和夹层型为主不同,中国页岩油主要分布在准噶尔盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地等陆相湖盆中,储层类型以基质型为主^[7-11]. 松辽盆地是中国页岩油资源潜力最大的陆相湖盆之一,近年来相继在盆地北部齐家、古龙和三肇凹陷获得页岩油工业油流. 白垩系青山口组一段(青一段)作为页岩油主要勘探层位,其中广泛发育较纯的半深湖—深湖相暗色泥页岩,

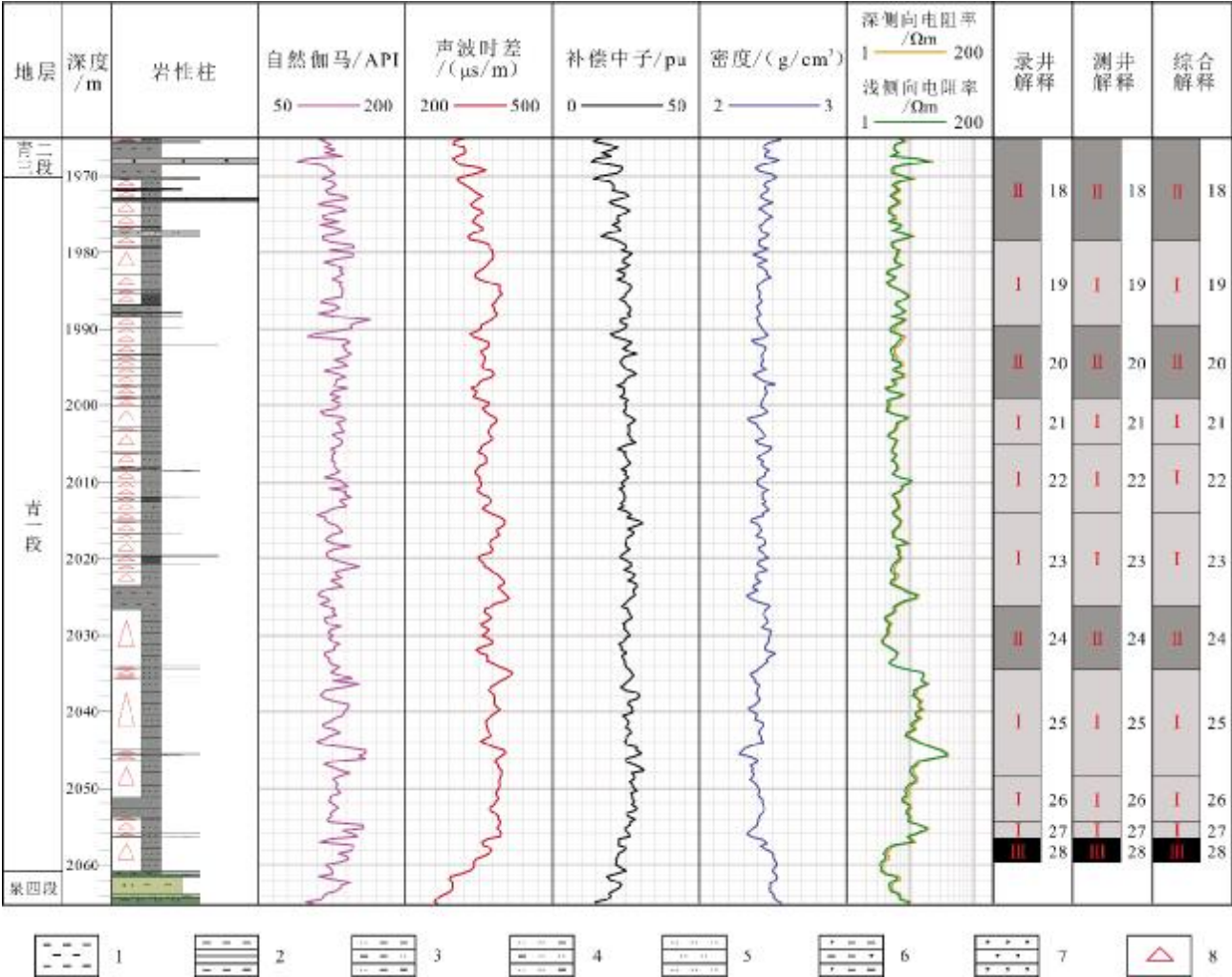


图 1 松页岩油 3 井青一段页岩油层分布图

Fig. 1 Distribution of shale oil reservoirs in the 1st member of Qingshankou Formation in SYY3 well

1—泥岩(mudstone); 2—泥页岩(muddy shale); 3—粉砂质泥岩(silty mudstone); 4—泥质粉砂岩(argillaceous siltstone); 5—粉砂岩(siltstone); 6—含介形虫泥岩(ostracoda-bearing mudstone); 7—介形虫层(ostracoda layer); 8—荧光(fluorescence)

被认为是典型的基质型页岩油储层^[12-14]。

由于基质型页岩油滞留于纳米级孔隙和微裂缝中,难以直接开采,需要通过水力压裂技术对页岩油储层进行改造,才能获得较高的产量,因此如何选取最有利的压裂层位则成为在储层压裂改造过程中需要解决的首要问题。相对于夹层型和裂缝型储层,湖相泥页岩基质储层具有岩性更致密、泥页岩塑性更强、原始渗流能力更弱等特征,因而通过压裂改造获得工业油流的难度更大。直井压裂选层可以为水平井压裂求产找准靶框,降低勘探风险和成本,但目前尚无成熟的针对湖相泥页岩基质储层的直井压裂选层方法。本文以松辽盆地三肇凹陷松页油 3 井为例,综合录井、测井和分析测试资料,在对各项页岩油地质参数进行综合分析的基础上,建立一套适用于湖相泥页岩基质储层的直井压裂选层方法,以期为湖相页岩油的勘探开发提供有益的借鉴。

1 青一段页岩油层分布

松页油 3 井是位于松辽盆地三肇凹陷中部的 1 口页岩油参数井,自上而下钻遇地层为第四系,新近系泰康组,上白垩统明水组、四方台组、嫩江组、姚家组、青山口组,下白垩统泉头组(未穿)。在松页油 3 井钻探过程中,对青一段进行了全段取心。通过现场岩心观察和精细描述,发现青一段岩性主要为暗色泥岩和泥页岩,局部夹粉砂岩薄层,泥岩和泥页岩占地层厚度百分比为 97.39%(图 1),总体上宏观裂缝不发育,属于典型的湖相泥页岩基质储层。

根据录井、测井解释数据,松页油 3 井目的层青一段综合解释储层 94.6 m/ 11 层,按试采产能将储层分为工业油流(Ⅰ类)、低产油流(Ⅱ)、少量油或不产油(Ⅲ)3 类。其中Ⅰ类页岩油层 60.3 m/ 7 层(19、21、22、23、25、26、27 号层),Ⅱ类页岩油层 31.2 m/ 3 层(18、20、24 号层),Ⅲ类页岩油层 3.1 m/ 1 层(28 号层)(图 1)。初步选择 19、21、22、23、25、26、27 号层为压裂备选层。

2 页岩油层参数特征

综合考虑油气产能与储层特征的关系以及压裂施工条件因素,认为电性、物性、含油气性、烃源岩性、脆性、可压性 6 项指标对湖相泥页岩基质储层的压裂改造效果和页岩油产能将有较大影响。下面对松页油 3

井青一段Ⅰ类页岩油层的上述 6 项指标进行综合分析,以此作为压裂选层的依据。

2.1 电性参数特征

声波时差、中子、密度和电阻率等电性参数可反映地层的含油气性、孔隙度等特征。页岩油层通常具有高声波时差、高补偿中子、低密度、高电阻率“三高一低”的特征^[15-17]。松页油 3 井青一段Ⅰ类页岩油层声波时差为 357.0~391.2 μs/m,补偿中子为 24.5~27.4 pu,密度为 2.37~2.44 g/cm³,电阻率为 6.0~16.0 Ωm。整体上青一段声波时差、补偿中子、密度曲线波动较为平缓,而电阻率曲线在青一段下部明显高于上部,各项测井曲线值随深度的增加逐渐增大(图 1),表明青一段孔隙度和含油性自上而下逐渐增大的特征。各层的岩性密度大致相当,而 23、25、26 号层声波时差、补偿中子和电阻率值较高,说明这些层具有较高的孔隙度和含油性(表 1)。

表 1 松页油 3 井青一段Ⅰ类页岩油层电性特征表

Table 1 Electric parameters for the K₂gn¹ shale oil reservoir of Type I in SY3 well

解释层号	井段/m	厚度/m	声波时差/ (μs/m)	补偿中子/ pu	密度/ (g/cm ³)	地层真电 阻率/Ωm
19	1978.4~1989.5	11.1	373.4	24.9	2.42	6.7
21	1999.0~2005.0	6.0	371.4	26.1	2.41	6
22	2005.0~2014.0	9.0	357	24.5	2.44	6.6
23	2014.0~2026.1	12.1	384.5	26.5	2.41	7.3
25	2034.4~2048.3	13.9	384	26.8	2.38	16
26	2048.3~2054.3	6.0	387	27.4	2.41	10.3
27	2054.3~2056.5	2.2	353.4	20.5	2.46	7.4

2.2 物性参数特征

松页油 3 井青一段 7 个Ⅰ类页岩油层测井解释孔隙度为 6.6%~8.3%,渗透率为 0.135~0.330 mD。总体上看,青一段下部Ⅰ类页岩油层的孔隙度和渗透率高于上部。其中,除 22、26 号层孔隙度较低外,其余各层孔隙度大致相当,尤其以 23、25、27 号层最高,孔隙度达到 8%以上。渗透率也以 23、25、27 号层最高,均大于 0.3 mD;19 和 21 号层次之;22 和 26 号层较低。综合对比孔隙度和渗透率,23、25、27 号层物性最好(表 2)。

表 2 松页油3 井青一段 I 类页岩油层物性特征表
Table 2 Physical parameters for the K_{qn}^1 shale oil reservoir of Type I in SYY3 well

解释层号	孔隙度/%	渗透率/mD
19	7.7	0.244
21	7.7	0.225
22	7.0	0.150
23	8.3	0.330
25	8.1	0.300
26	6.6	0.135
27	8.2	0.315

2.3 含油气性参数特征

综合测录井数据,采用核磁测井解释含油饱和度,地化录井热解 S_1 反映油层的含油性,利用气测录井数据指示油层的含气性.松页油 3 井青一段 I 类页岩油层的含油饱和度为 4.1%~37.6%,其中 19、23、25 号层含油饱和度较高,均在 30%以上;21、22、27 号层次之;26 号层含油饱和度最低.青一段 I 类页岩油层 S_1 为 5.8×10^{-3} ~ 9.9×10^{-3} ,整体上有随深度增加 S_1 逐渐增大的趋势,其中 19、25、26、27 号层 S_1 值最高,均达到 7.0×10^{-3} 以上,具有较好的生烃潜力,其余各层 S_1 值大致相当.青一段气测全烃值普遍较高,气测录井异常显示段厚度大,整体上有随深度增加气测全烃值增大的趋势,除了 18 号层全烃值较低外,其余各层全烃值均在 1%以上或接近 1%,其中以 25、26、27 号层全烃值最高.总体评价,23、25、27 号层的含油气性最好(表3).

表 3 松页油 3 井青一段 I 类页岩油层含油气性特征表
Table 3 Oil-gas bearing possibility for the K_{qn}^1 shale oil reservoir of Type I in SYY3 well

解释层号	含油饱和度/%	$S_1/10^{-3}$	全烃值/%
19	30.2	7.6	1.16
21	26.0	6.0	1.17
22	22.9	5.8	0.91
23	37.6	5.9	0.96
25	30.2	9.0	2.00
26	4.1	9.9	2.97
27	28.9	8.6	1.78

2.4 烃源岩性参数特征

松辽盆地北部青一段半深湖—深湖相烃源岩有机质类型整体主要为 I 型和 II₁ 型^[18-19],以生油为主,因此有机质类型不是制约页岩油富集的主要因素,本研究中主要针对有机质丰度和有机质成熟度进行烃源岩性参数特征分析.

总有机碳含量(TOC)是评价烃源岩有机质丰度的重要指标^[20].松页油 3 井青一段 I 类页岩油层测井解释 TOC 为 2.5%~5.1%,各层 TOC 均超过 2.0%,整体上青一段下部 TOC 大于上部,其中以 23、25、27 号层 TOC 值最大(表 4).

镜质体反射率(R_o)随热演化程度的升高而稳定增大,并具有相对广泛、稳定的可比性,因此 R_o 成为目前应用最为广泛、最为权威的成熟度指标^[21].松页油 3 井青一段 I 类页岩油层实测 R_o 为 0.84%~0.98%,最高热解峰温 T_{max} 均在 445 ℃左右,表明各页岩油层均处于中等成熟阶段.整体上随深度增加 R_o 值有逐渐增大的趋势,其中 25、26、27 号层 R_o 值较高,表明该页岩油层成熟度较高,其余各层大致相当(表 4).

表 4 松页油 3 井青一段 I 类页岩油层烃源岩特征数据表
Table 4 Source rock characteristics for the K_{qn}^1 shale oil reservoir of Type I in SYY3 well

解释层号	TOC/%	R_o /%	$T_{max}/^{\circ}C$
19	3.6	0.84	445.09
21	3.5	0.87	445.61
22	2.5	0.88	446.08
23	4.6	0.89	445.28
25	4.5	0.94	449.48
26	3.0	0.98	445.40
27	5.1	0.97	449.67

2.5 脆性参数特征

泥页岩脆性越好,压裂后造缝效果越好,因此脆性特征也是优选压裂层位的一项参考指标^[22].基于岩性扫描测井解释结果,松页油 3 井青一段 I 类页岩油层全岩矿物组成以长英质和黏土矿物为主,黏土矿物含量最高,介于 35.8%~47.3%之间,其次为石英和长石、碳酸盐矿物和黄铁矿.黏土矿物含量高,说明青一段泥页岩基质储层整体偏塑性.根据矿物组分法计算脆

性指数,松页油3井青一段I类页岩油层脆性指数为30.6%~44.3%,其中22、25、26、27号层脆性指数相对其余各层较高,有利于进行压裂改造(表5)。

表5 松页油3井青一段I类页岩油层矿物含量及脆性指数表
Table 5 Mineral content and brittleness index for the K_{qn}^1 shale oil reservoir of Type I in SYY3 well

解释层号	黏土矿物/%	石英/%	长石/%	方解石/%	铁白云石/%	黄铁矿/%	脆性指数/%
19	40.7	22.5	24.9	7.2	2.9	1.8	33.2
21	47.3	23.0	21.1	4.4	2.8	1.4	30.6
22	42.5	22.6	20.3	9.9	3.2	1.4	36.3
23	43.5	22.2	22.5	5.6	4.8	1.5	33.0
25	39.9	25.2	20.5	9.1	3.6	1.7	38.5
26	45.0	29.3	15.7	4.6	4.2	1.3	38.5
27	35.8	31.8	18.9	10.3	1.4	1.7	44.3

2.6 可压性参数特征

可压性指的是储层经过水力压裂后可以被有效改造的性质,能够反映泥页岩基质储层的综合特征,结合岩石力学参数和矿物组成可评价各页岩油层的可压性^[23]。松页油3井青一段I类页岩油层泊松比为0.29~0.31,杨氏模量为 $1.23\times10^4\sim1.69\times10^4$ MPa,各层泊松比和杨氏模量大致相当,说明各层弹性和刚性相差不大。各层破裂压力为40.23~42.27 MPa,其中23、25、27号层破裂压力较低,表明这些页岩油层相对容易被压开,岩层更容易从薄弱处起裂形成裂缝(表6)。

表6 松页油3井青一段I类页岩油层可压性表
Table 6 Fracturing indexes for the K_{qn}^1 shale oil reservoir of Type I in SYY3 well

解释层号	泊松比	杨氏模量/ 10^4 MPa	破裂压力/MPa
19	0.31	1.33	40.91
21	0.31	1.28	41.79
22	0.31	1.39	42.27
23	0.29	1.27	40.23
25	0.29	1.26	40.88
26	0.30	1.23	42.20
27	0.29	1.23	40.89

3 层次分析法与压裂层位优选

3.1 层次分析法

综合对比松页油3井青一段I类页岩油层电性、物性、含油气性、烃源岩性、脆性和可压性6项指标,发现不同层的各项指标排名互有优劣,为减少人为主观因素对选层结果的干扰,研究中采用层次分析法对6项指标进行综合计算,以此量化筛选出最有利的压裂层位。

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是20世纪70年代由美国匹兹堡大学运筹学家萨蒂提出的,将与决策总是有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。层次分析法的特点是在解决复杂问题的过程中,通过深入分析问题的本质、影响因素及其内在联系,把解决问题的过程转化为数学模型,从而为解决复杂问题提供决策^[24-25]。

层次分析法思路如下:依据层次分析法要素标度尺,将电性、物性、含油气性、烃源岩性、脆性和可压性6项指标对压裂选层有利程度的影响进行两两比较,构造正交判断矩阵,从而建立各项指标的权重模型,使各项指标对于压裂选层有利性的影响得以定量显示。将各项指标参数进行归一化处理,得出各项指标对压裂有利程度的归一化值,再加入各项指标对应的权重进行运算,便可知青一段7个I类页岩油层的压裂有利性。

3.2 各项指标参数归一化

以松页油3井所有页岩油层特征参数作为背景值,对这7个页岩油层的6项指标参数进行归一化处理,统一各项参数的量级,从而避免了因参数量级不同而对计算结果造成的误差。参数归一化方法如下:

$$\bar{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{1}$$

$$\bar{x} = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{2}$$

其中, $\bar{x}$ 为各项参数归一化之后的数值, x 为各项参数原值, $x_{\min}$ 为所有页岩油层该参数的最小值, $x_{\max}$ 为所有页岩油层该参数的最大值。对于诸如岩性密度、泊松比、破裂压力等,其数值与压裂选层有利性呈负相关的参数采用式(2)进行归一化计算,而其余数值与压裂选层有利性呈正相关的参数采用公式(1)计算。

经过归一化计算后,各项参数值均处于 0~1 之间. 由于在一项指标中包含多项参数(如物性指标中包含孔隙度和渗透率两项参数),还需对同一项指标中的各项参数进行算数平均数合并(式 3),计算后的结果可代表各项指标对压裂的有利程度(表 7).

$$X=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n\bar{x}_k$$

(3)

其中,n 为同一项指标中特征参数的个数,X 为指标归一化值.

表 7 松页油 3 井青一段压裂选层参数归一化数据表

Table 7 Normalized parameter of fracturing layer selection in the 1st member of Qingshankou Formation in SYY3 well

层号	电性归一化值	物性归一化值	含油气性归一化值	烃源岩性归一化值	脆性归一化值	可压性归一化值
19	0.55	0.81	0.63	0.52	0.52	0.58
21	0.59	0.78	0.53	0.58	0.44	0.49
22	0.42	0.59	0.47	0.48	0.61	0.54
23	0.69	1.00	0.60	0.75	0.51	0.70
25	0.93	0.94	0.76	0.85	0.67	0.65
26	0.79	0.52	0.65	0.76	0.67	0.48
27	0.91	0.97	0.71	0.98	0.84	0.62

3.3 基于层次分析法的压裂层位优选

在引进低渗透砂岩储层的压裂选层指标判断标度的基础上^[25],结合湖相泥页岩基质储层的特点进行优化,形成一套适用于湖相泥页岩基质储层的压裂选层方法模型,然后将各页岩油层的 6 项指标参数代入压裂选层方法模型中进行计算.

首先,对电性、物性、含油气性、烃源岩性、脆性、可压性 6 项指标的重要性进行分析. 含油气性反映储层原油的性质和含量,是压裂选层最重要的影响因素;烃源岩性反映页岩油层的生烃潜力,跟含油气性息息相关,也是极其重要的影响因素;物性反映储层的储集空间和渗流能力,是非常重要的影响因素;电性是储层的孔隙度和含油气性的间接反映,也是比较重要的影响因素;脆性影响压裂造缝效果,对压裂选层的影响一般重要;可压性是反映储层能否被有效改造的岩石力学性质,是压裂施工过程中必须考虑的因素,但是考虑到松页油 3 井的可压性参数差异不大,这里将可压性作为稍微重要的指标(表 8).

表 8 压裂选层指标重要性表

Table 8 Importance ranking of fracturing layer selection indicators

指标	属性	重要性
含油气性	反映储层原油的性质和含量,是物质基础	最重要
烃源岩性	反映油层的生烃潜力	极其重要
物性	反映储层的储集空间和渗流能力	非常重要
电性	间接反映储层的孔隙度和含油气性特征	比较重要
脆性	影响压裂造缝效果	一般重要
可压性	反映储层能否被有效改造	稍微重要

最终确定电性(C_1)、物性(C_2)、含油气性(C_3)、烃源岩性(C_4)、脆性(C_5)和可压性(C_6)这 6 项指标对压裂选层有利性的影响大小依次为: 含油气性>烃源岩性>物性>电性>脆性>可压性,对压裂选层有利性的判断矩阵为:

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
C_1	1	1/2	1/4	1/3	3	4
C_2	2	1	1/3	1/2	4	5
C_3	4	3	1	2	6	7
C_4	3	2	1/2	1	5	6
C_5	1/3	1/4	1/6	1/5	1	2
C_6	1/4	1/5	1/7	1/6	1/2	1

根据层次分析法模型计算,得出其特征向量为:
 $W=[0.0968,0.1674,0.3864,0.2583,0.0514,0.0397]^T$
各项指标对于压裂选层有利程度的权重见表 9.

表 9 压裂选层各项指标权重

Table 9 Weight coefficient of fracturing layer selection indicators

指标	电性	物性	含油气性	烃源岩性	脆性	可压性
权重	0.0968	0.1674	0.3864	0.2583	0.0514	0.0397

计算各页岩油层每一项指标的归一化参数值与其权重的乘积之和,即可得到各层的压裂有利性(表 10).
根据计算结果可知,松页油 3 井青一段各页岩油层的压裂选层有利性排序为:27 号层>25 号层>23 号层>26 号层>19 号层>21 号层>22 号层.

表 10 松页油 3 井青一段 I 类页岩油层压裂选层有利性分析表

Table 10 Favorability analysis of fracturing layer selection for the K_{2qn}¹ shale oil reservoir of Type I in SYY3 well

层号	电性加权 归一化值	物性加权 归一化值	含油气性加权 归一化值	烃源岩性加权 归一化值	脆性加权 归一化值	可压性加权 归一化值	压裂选层 有利性	排名
19	0.0532	0.1349	0.2330	0.1353	0.0265	0.0232	0.6061	5
21	0.0575	0.1300	0.1979	0.1491	0.0226	0.0195	0.5767	6
22	0.0405	0.0980	0.1753	0.1244	0.0311	0.0214	0.4907	7
23	0.0666	0.1680	0.2288	0.1938	0.0263	0.0276	0.7111	3
25	0.0897	0.1566	0.2816	0.2188	0.0345	0.0257	0.8069	2
26	0.0762	0.0869	0.2387	0.1957	0.0346	0.0192	0.6514	4
27	0.0877	0.1623	0.2640	0.2539	0.0433	0.0248	0.8359	1

对松页油 3 井 23、25、27 号层进行压裂试油求产，实现了松辽盆地三肇凹陷页岩油工业油流突破，证明该压裂选层方法可行有效。

4 结论

通过录井、测井解释数据查明了松页油 3 井青一段 7 个 I 类页岩油层分别为 19、21、22、23、25、26、27 号层，基于层次分析数学模型综合分析电性、物性、含油气性、烃源岩性、脆性、可压性 6 项指标，对各 I 类页岩油层的压裂有利性进行了综合排名，即 27 号层>25 号层>23 号层>26 号层>19 号层>21 号层>22 号层，从而建立了一套湖相泥页岩基质储层直井压裂选层方法。

对松页油 3 井 23、25、27 号层进行了压裂试油，实现了松辽盆地三肇凹陷页岩油工业油流突破，证实该压裂选层方法可行有效，可推广应用于湖相基质型页岩油的甜点层优选和水平井部署。

参考文献(References):

[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):322-331.
Zhang J C, Lin L M, Li Y X, et al. Classification and evaluation of shale oil[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5):322-331.

[2]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 C N, Yang Z, Cui J W, 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.

[3]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 Z X, Zhang W Z, Liang C, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196.

[4]孙超,姚素平. 页岩油储层孔隙发育特征及表征方法[J]. 油气地质与采收率,2019,26(1):153-164.
Sun C, Yao S P. Pore structure and characterization methods of shale oil reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 153-164.

[5]杨雷,金之钧. 全球页岩油发展及展望[J]. 中国石油勘探,2019,24(5):553-559.
Yang L, Jin Z J. Global shale oil development and prospects [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 553-559.

[6]周庆凡,金之钧,杨国丰,等. 美国页岩油勘探开发现状与前景展望[J]. 石油与天然气地质,2019,40(3):469-477.
Zhou Q F, Jin Z J, Yang G F, et al. Shale oil exploration and production in the US: Status and outlook[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 469-477.

[7]边瑞康,武晓玲,包书景,等. 美国页岩油分布规律及成藏特点[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2014,29(1):1-9.
Bian R K, Wu X L, Bao S J, et al. Distribution law and reservoir forming characteristics of shale oil in America[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(1): 1-9.

[8]张欣,刘吉余,侯鹏飞. 中国页岩油的形成和分布理论综述[J]. 地质与资源,2019,28(2):165-170.
Zhang X, Liu J Y, Hou P F. A Review on the formation and distribution theories of the shale oil in China[J]. Geology and Resources, 2019, 28(2): 165-170.

[9]胡素云,赵文智,侯连华,等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. 石油勘探与开发,2020,47(4):819-828.
Hu S Y, Zhao W Z, Hou L H, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 819-828.

[10]王倩茹,陶士振,关平. 中国陆相盆地页岩油研究及勘探开发进展[J]. 天然气地球科学,2020,31(3):417-427.

- Wang Q R, Tao S Z, Guan P. Progress in research and exploration & development of shale oil in continental basins in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(3): 417-427.
- [11] 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 S F, Xue H T, Wang M, et al. Several key issues and research trends in evaluation of shale oil[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(10): 1309-1322.
- [12] 杨建国, 李士超, 姚玉来, 等. 松辽盆地北部陆相页岩油调查取得重大突破[J]. *地质与资源*, 2020, 29(3): 300.
- Yang J G, Li S C, Yao Y, et al. Significant breakthrough in the continental shale oil survey in northern Songliao Basin[J]. *Geology and Resources*, 2020, 29(3): 300.
- [13] 柳波, 吕延防, 冉清昌, 等. 松辽盆地北部青山口组页岩油形成地质条件及勘探潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 280-285.
- Liu B, Lü Y F, Ran Q C, et al. Geological conditions and exploration potential of shale oil in Qingshankou Formation, northern Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 280-285.
- [14] 柳波, 石佳欣, 付晓飞, 等. 陆相泥页岩层系岩相特征与页岩油富集条件——以松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段富有机质泥页岩为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 828-838.
- Liu B, Shi J X, Fu X F, et al. Petrological characteristics and shale oil enrichment of lacustrine fine-grained sedimentary system: A case study of organic-rich shale in first member of Cretaceous Qingshankou Formation in Gulong sag, Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 828-838.
- [15] 章钰, 孟凡顺. 基于声波测井资料确定泥质砂岩储层孔隙度的方法研究[J]. *内蒙古石油化工*, 2008(18): 82-84.
- Zhang Y, Meng F S. Method research of porosity argillaceous sandstone based on acoustic logging data[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2008(18): 82-84.
- [16] 吕斯端, 夏宏泉, 文晓峰. 延长组致密油储层流体性质测井识别方法[J]. *测井技术*, 2017, 41(2): 211-216.
- Lyu S D, Xia H Q, Wen X F. Identification of reservoir fluid properties of tight oil with logs for Yanchang Group[J]. *Well Logging Technology*, 2017, 41(2): 211-216.
- [17] 蒋云箭. 裂缝-孔洞型储层测井流体识别新方法[J]. *测井技术*, 2017, 41(6): 676-679.
- Jiang Y J. New method of fluid type identification for fracture-vug type reservoirs[J]. *Well Logging Technology*, 2017, 41(6): 676-679.
- [18] 任颖惠, 闫明琦, 李闻虚, 等. 松辽盆地齐家-古龙凹陷泥页岩特征及成藏期次[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(6): 660-666.
- Ren Y H, Yan M Q, Li W X, et al. Study on shale characteristics and reservoir accumulation period in Qijia-Gulong Depression, Songliao Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2019, 46(6): 660-666.
- [19] 王玉华, 梁江平, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油资源潜力及勘探方向[J]. *大庆石油地质与开发*, 2020, 39(3): 20-34.
- Wang Y H, Liang J P, Zhang J Y, et al. Resource potential and exploration direction of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2020, 39(3): 20-34.
- [20] 杜江民, 张小莉, 钟高润, 等. 致密油烃源岩有机碳含量测井评价方法优选及应用——以鄂尔多斯盆地延长组长7段烃源岩为例[J]. *地球物理学进展*, 2016, 31(6): 2526-2533.
- Du J M, Zhang X L, Zhong G R, et al. Analysis on the optimization and application of well logs identification methods for organic carbon content in source rocks of the tight oil: Illustrated by the example of the source rocks of Chang 7 member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Progress in Geophysics*, 2016, 31(6): 2526-2533.
- [21] 陈治军, 张佳琪, 牛凌燕, 等. 芳烃参数在湖相烃源岩成熟度评价中的适用性——以银根-额济纳旗盆地中生界烃源岩为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(8): 928-939.
- Chen Z J, Zhang J Q, Niu L Y, et al. Applicability of aromatic parameters in maturity evaluation of lacustrine source rocks: A case study of Mesozoic source rocks in Yingen-Ejinaqi Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(8): 928-939.
- [22] 王晓东, 王一航, 王永田, 等. 利用矿物含量计算砂岩脆性指数——以鄂尔多斯盆地合水地区长6段致密砂岩储层为例[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(3): 367-373.
- Wang X D, Wang Y H, Wang Y T, et al. A method of computing brittleness index of sandstone by mineral content: A case study of Chang-6 tight sandstone reservoir in Heshui, Ordos Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2018, 45(3): 367-373.
- [23] 夏遵义, 马海洋, 房堃. 渤海湾盆地沾化凹陷陆相页岩储层岩石力学特征及可压裂性研究[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(1): 134-141.
- Xia Z Y, Ma H Y, Fang K. Rock mechanical properties and fracability of continental shale in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(1): 134-141.
- [24] 王帅帅, 武斌. 层次分析法的研究与应用[J]. *中国科技博览*, 2015(44): 178-179.
- Wang S S, Wu B. Research and application of analytic hierarchy process[J]. *China Science and Technology Review*, 2015(44): 178-179. (in Chinese)
- [25] 党海龙, 崔鹏兴, 刘双双, 等. 低渗透油藏压裂选层方法研究及应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(4): 1082-1088.
- Dang H L, Cui P X, Liu S S, et al. Study and application of fracturing selection method in low permeability reservoir[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2018, 38(4): 1082-1088.