

大庆长垣扶余油层致密油低产井控制因素分析及增产技术对策

王艳¹, 周海超², 孙海雷¹

¹中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆

²中国石油大庆油田有限责任公司第一采油厂, 黑龙江 大庆

收稿日期: 2023年11月15日; 录用日期: 2024年2月19日; 发布日期: 2024年2月29日

摘要

松辽盆地北部大庆长垣扶余油层自上世纪50年代末勘探以来, 效果显著并已陆续投入开发, 但低产井所占比例较大一直是制约致密油效益增储的瓶颈。本文从地质和工程改造等多方面对控制油井产能的因素开展分析, 并采用灰色关联分析法定量计算各因素的关联度和权重系数, 确定了影响产能的主控因素依次为压裂加液强度、压裂加砂强度、储层渗透率、油层有效厚度、储层电阻率、含油饱和度及水平应力差。在此基础上, 运用模糊综合评判法计算低产井主控因素综合得分, 对低产井开展综合分析并优选出可重新试油的潜力井, 目前已完成重新试油的井日产油量达到原来的10倍。同时, 依据产能主控因素, 制定相应的技术对策和增产措施, 对解放低产井产能及油田提产增效有着深远的意义。

关键词

大庆长垣, 扶余油层, 致密油, 低产井, 灰色关联

Analysis on Control Factors of Low Production Wells of Tight Oil in Fuyu Reservoir of Daqing Placanticline and Technical Countermeasures to Improve Production

Yan Wang¹, Haichao Zhou², Hailei Sun¹

¹Exploration and Development Research Institute, Petro China Daqing Oil Field Company Limited, Daqing Heilongjiang

²First Oil Production Plant, Petro China Daqing Oil Field Company Limited, Daqing Heilongjiang

文章引用: 王艳, 周海超, 孙海雷. 大庆长垣扶余油层致密油低产井控制因素分析及增产技术对策[J]. 石油天然气学报, 2024, 46(1): 1-9. DOI: 10.12677/jogt.2024.461001

Abstract

Fuyu reservoir of Daqing placanticline in northern Songliao Basin has achieved remarkable results since its exploration in the late 1950s and has been successively put into development. However, the large proportion of low production wells has always been the bottleneck problem restricting the increase of economic reserves of tight oil. In this paper, the factors controlling oil well productivity are analyzed from many aspects such as geology and engineering transformation, the grey correlation analysis method is used to quantitatively calculate the correlation degree and weight coefficient of each factor. It is determined that the main controlling factors affecting productivity are fluid adding intensity and sand adding intensity during fracturing, reservoir permeability, effective thickness of reservoir, reservoir resistivity, oil saturation and horizontal stress difference. On this basis, the fuzzy comprehensive evaluation method is used to calculate the comprehensive score of the main control factors of low production wells, carry out comprehensive analysis of low production wells, and select the potential wells that can be retested, at present, one oil well has been retested, and its daily oil production is 10 times that of the first oil test. At the same time, according to the main control factors of production capacity, the corresponding technical countermeasures and production increasing measures are formulated. The research of this paper has far-reaching significance for liberating the productivity of low production wells and increasing production and economic benefits.

Keywords

Daqing Placanticline, Fuyu Reservoir, Tight Oil, Low Production Wells, Grey Correlation Analysis

Copyright © 2024 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

大庆长垣位于松辽盆地北部中央拗陷区，扶余油层属于下白垩统泉头组四段及三段上部地层，上世纪 50 年代末开始陆续投入勘探开发，但由于储层物性差，受限于工艺技术水平，难以形成效益规模储量，所以在 2000 年以前发展缓慢。进入 21 世纪后，随着致密油研究的不断深入和勘探开发技术工艺水平的不断发展更新，大庆长垣扶余油层致密油展现出较大的勘探潜力和开发前景，但同时仍然存在着制约进一步勘探开发的瓶颈问题，目前大庆长垣扶余油层开展试油的探井和评价井中低产井占比高达 31%，弄清低产井产能的主要控制因素，并制定相应的技术对策，不仅可以解放大量低产井的产量，更能有效引导和规范后期的勘探部署。因此，开展低产井主控因素的研究，对于区域内低产能主控因素识别和油田增产提效有重要意义。

国内外针对致密油低产井控制因素分析方面，多为单一控制因素的统计分析，没有运用综合的、定量的分析方法。低产因素与产能预测一般只考虑了单一因素与产能的关系，没有定量评价控制因素对产能的影响程度大小，同时考虑的影响因素一般较少，多采用线性拟合方法建立控制因素与产能关系式。本文运用灰色关联分析法和模糊综合评判法，通过地质和工程改造等多方面对控制油井产能的因素进行分析，这两种方法多用在多因素共同作用于一个结果的类似分析和研究，如农业生产、教育、环境科学、

医药卫生等多个领域[1] [2], 两种方法结合应用在低产井产能的影响因素分析方面尚属首次, 能有效识别影响产能的主控因素并优选潜力井, 为制定有效的技术对策和增产措施提供方法, 对解放扶余油层低产井产能及油田高效开发有着深远的意义。

2. 影响因素分析

2.1. 地质条件分析

大庆长垣是松辽盆地最大的正向构造圈闭, 西接齐家 - 古龙凹陷, 东邻三肇凹陷, 扶余油层顶面构造主体从北向南发育有喇嘛甸、萨尔图、杏树岗、太平屯、高台子、葡萄花六个穹窿构造, 西侧又发育萨西、杏西、高西、葡西、新肇和敖南 6 个鼻状构造, 鼻状构造斜插入烃源岩成熟的凹陷内, 油源充足, 油气成藏条件十分有利。从目前钻井情况来看, 基本不存在无油气显示井, 油气大面积连片分布。从长垣主体构造到西侧带, 随着深度增加, 物性变差, 低产油流井占比逐渐增高(图 1)。

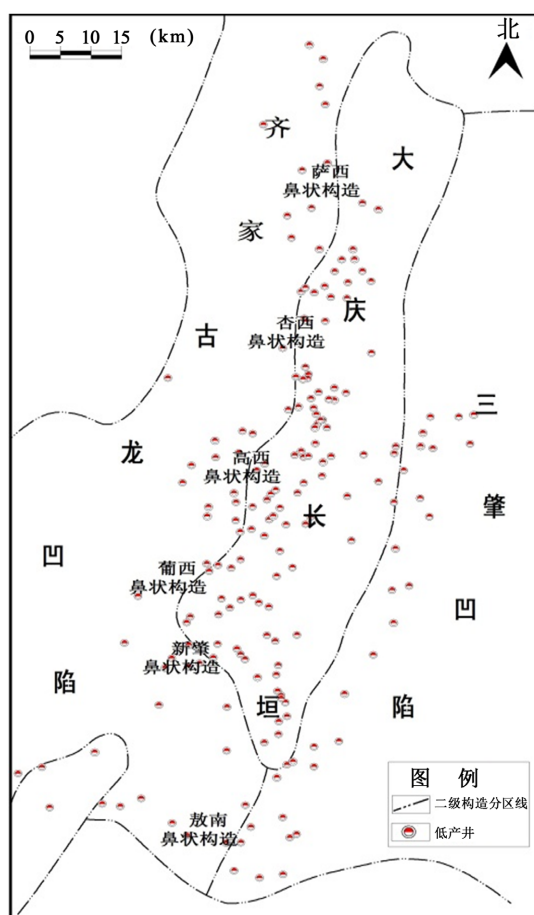


Figure 1. Structural zoning and low production well distribution map of Fuyu oil layer in Daqing Placanticline

图 1. 大庆长垣扶余油层构造区划及低产井分布图

油源和成藏都十分有利, 那么储层中油气是否充足以及油气能否顺利采出地层便成为决定产能的两个重要方面。笔者从这两个大方面出发分别对油层有效厚度、沉积微相类型、含油显示级别、储层孔隙度、储层电性、含油饱和度、储层渗透率、石油粘度密度、储层压力、储层脆性和地应力等 11 项影响因素开展统计分析。油层有效厚度和储层孔隙度控制油气的储存空间, 油层有效厚度和储层孔隙度越大,

储油规模越大；沉积微相类型和储层电性值反映了储层的品质，曲流河道、分流河道比决口河道、决口扇及席状砂的含油性好，储层深侧向电阻率越大含油性越好；含油显示级别和含油饱和度代表了油气的充注程度，含油显示级别越高、含油饱和度越大含油越饱满；储层渗透率影响着储层的有效性和渗透性，渗透率越大油气越易有效产出；原油粘度和密度使原油在运动过程中产生内摩擦阻力，油质越重、粘度越大，油的流动性越差，产出效果就越差；储层压力代表着石油的产出动力，储层压力高，压力系数大，则储层能量高，流体产出动力足；储层脆性和地应力是影响储层压裂改造的重要因素，储层脆性指数越高，最大主应力与最小主应力的差值越小，越利于后期缝网压裂改造。

2.2. 储层压裂改造程度分析

由于致密油储层物性差(孔隙度 $<12\%$ 、渗透率 $<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) [3] [4],常规压裂常常无法获得较高产能,因此,2012年以来扶余油层致密油的勘探开始采用大规模体积压裂技术。体积压裂改造增加了油井与地层的接触面积,改善了储层的渗流条件,大大提高了单井产能[5]。从大庆长垣扶余油层试油资料统计来看,大规模压裂后的试油工业率较常规压裂提升了40%。储层的压裂改造程度直接决定了油井的最终产能,引入每米加砂量(即加砂强度)和每米加液量(即加液强度)来表征单井储层的改造程度,加砂加液量越大,储层改造程度越好,产能也相对越好。

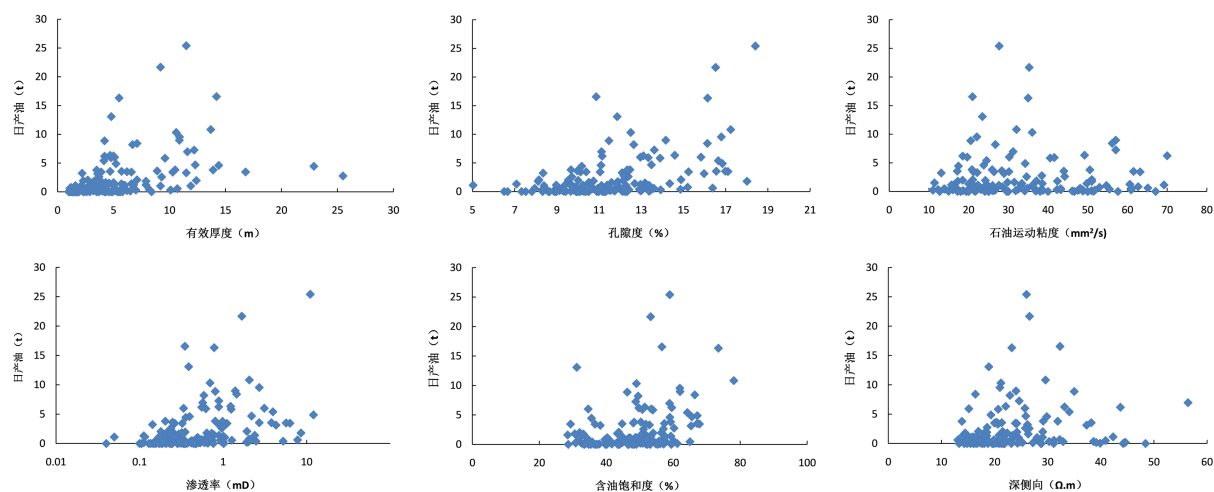


Figure 2. Relationship between various influencing factors and oil production

图 2. 各影响因素与产油量关系图

2.3. 主控因素确定

从单因素与产能的关系上看,每个因素对产能都有一定的影响,但相关性又不是特别明显(图 2),说明产油量大小是一个多因素综合影响的结果,我们用定性分析无法准确判断影响因素的“主次”关系,这里引用了灰色关联分析方法开展定量计算。关联度是两个系统之间的因素关联性大小的量度,从几何角度看,关联度实质上是参考数列与比较数列曲线形状的相似程度。关联度越大,表示两者关系越密切,影响程度越大,反之,则越小。灰色关联分析法是通过计算关联度,找出影响目标值的主要因素,进而从总体上把握系统的动态运动规律[6]。目前,灰色关联分析法已广泛应用于油气田勘探开发的许多方面,为精准、高效地勘探开发油田打下良好的基础[7] [8] [9]。

应用灰色关联分析的数据完成无量纲化处理后,开始计算比较数列与参考数列的关联系数和关联度。这里参考数列为日产油量,比较数列为各影响因素。

设参考数列为 $\{x_{0(t)}\} = \{x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}\}$ ；与参考数列作关联程度比较的 p 个数列(常称为比较数列)为:

$$\{x_{1(t)}, x_{2(t)}, \dots, x_{p(t)}\} = \begin{Bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{p1} & x_{p2} & \dots & x_{pn} \end{Bmatrix}$$

上式中, n 为数列的数据长度, 即数据的个数。将第 k 个比较数列 ($k=1, 2, \dots, p$) 各期的数值与参考数列对应期的差值的绝对值记为:

$$\Delta o_{k(t)} = |x_{0(t)} - x_{k(t)}| \quad t=1, 2, \dots, n$$

对于第 k 个比较数列, 分别记 n 个 $\Delta o_{k(t)}$ 中的最小数和最大数为 $\Delta o_{k(\min)}$ 和 $\Delta o_{k(\max)}$ 。对 p 个比较数列, 又记 p 个 $\Delta o_{k(\min)}$ 中的最小者为 $\Delta(\min)$, p 个 $\Delta o_{k(\max)}$ 中的最大者为 $\Delta(\max)$ 。这样 $\Delta(\min)$ 和 $\Delta(\max)$ 分别是所有 p 个比较数列在各期的绝对差值中的最小者和最大者。于是, 其关联系数和关联度可通过下式计算获得:

关联系数[10]: ρ 为分辨系数, 取 0.1;

$$\zeta_{ok}(t) = \frac{\Delta(\min) + \rho\Delta(\max)}{\Delta o_{k(t)} + \rho\Delta(\max)} \quad (1)$$

关联度[10]:

$$r_{ok} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \zeta_{ok}(t) \quad (2)$$

r_{ok} 即为第 k 个比较数列与参考数列的关联度, 关联度数值本身没有实际意义, 只是反映了比较数列与参考数列密切程度的相对大小, 如表 1 和图 3 所示, 可看出各因素对产能的影响程度各不相同, 其中影响较大的依次为加液强度、加砂强度、渗透率、有效厚度、深侧向电阻率、含油饱和度及水平应力差等 7 项因素, 这 7 项因素即为影响产能的主控因素(主控参数)。

3. 低产井综合评价

应用模糊综合评判法对油井开展综合评价, 综合评判法就是对其总体优劣受多种因素影响的事物, 做出一个能合理地综合这些因素的总体评判[10] [11]。

综合评判法的步骤为确定评价参数、计算参数的单项得分、确定参数的权重系数及计算综合评价得分等四步。这里评价参数即为以上确定的 7 大主控参数, 参数的权重系数也已通过关联度计算得出, 只需计算参数的单项得分和综合得分即可开展综合评价。

Table 1. Calculation table for correlation degree of evaluation parameters

表 1. 评价参数关联度计算表

项目	地质因素										工程因素		合计
	油气是否充足					油气能否产出					加液强度	加砂强度	
	有效厚度	深侧向电阻率	含油饱和度	孔隙度	含油显示	沉积相	渗透率	水平应力差	运动粘度	脆性指数			
关联度	0.63	0.36	0.34	0.21	0.18	0.15	0.76	0.31	0.21	0.11	0.77	0.75	4.78
权重系数	0.13	0.08	0.07	0.04	0.04	0.03	0.16	0.06	0.04	0.02	0.16	0.16	1

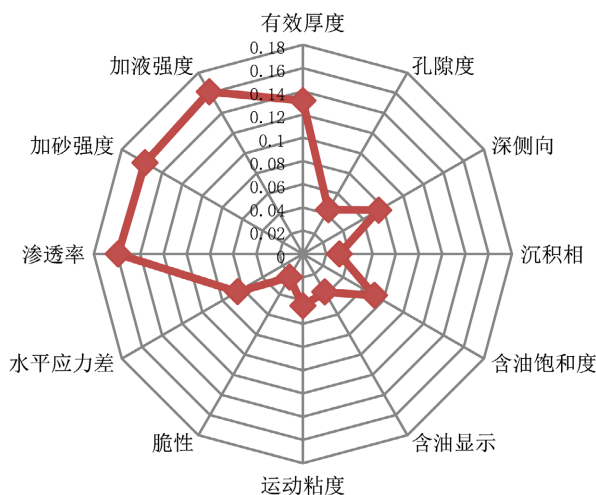


Figure 3. Radar chart of weights of factors influencing oil production
图 3. 产油量影响因素权重雷达图

3.1. 参数单项得分计算

对于参数值越大表示产能越大的参数用下式来计算单项得分(S_m):

$$S_m = \frac{X}{G - P}$$

对于参数值越小表示产能越大的参数用下式计算单项得分:

$$S_m = \frac{P - X}{P - G}$$

式中: X ——参数观察值; G ——有利参数值; P ——不利参数值。

3.2. 油井综合得分计算

因素单项得分乘以其权重系数, 再求和就得出所有主控因素的综合评价得分(REI):

$$REI = \sum_{i=1}^n S_{mi} \cdot \alpha_i$$

式中: n ——评价参数个数, α_i ——权重系数

综合得分计算结果见表 2, 从结果看, 综合得分值较高的油井日产油量均较高。

Table 2. Comprehensive scores of capacity evaluation parameters

表 2. 产能评价参数综合得分表

井号	渗透率 (mD)	有效厚度 (m)	深侧向 ($\Omega \cdot m$)	含油饱和度 (%)	水平应力差 (MPa)	地质因素总分	加液强度 (m^3/m)	加砂强度 (m^3/m)	工程因素总分	综合得分	日产油(t)
a	0.805	5.44	34.98	46.26	10.290	0.209	1571.0	53.85	0.274	0.483	8.872
b	0.698	11.92	21.19	49.01	6.327	0.283	249.0	33.78	0.092	0.374	10.320
c	1.249	10.00	20.67	53.92	6.068	0.265	230.0	37.93	0.097	0.363	5.840
d	2.391	7.00	20.82	59.29	6.695	0.297	18.9	3.26	0.008	0.305	1.400

续表

.....	0.324	8.48	20.64	36.65	7.464	0.207	540.0	19.55	0.096	0.303	3.432
.....	2.050	1.20	28.00	53.70	7.823	0.289	30.0	5.38	0.014	0.302	0.760
.....	0.991	25.50	18.59	60.24	7.529	0.289	23.8	3.65	0.010	0.299	2.760
.....	1.912	5.00	17.77	30.87	5.790	0.262	44.0	6.00	0.016	0.279	0.240
.....	1.044	4.62	29.02	11.11	6.920	0.262	50.5	4.21	0.014	0.275	1.058
.....	0.638	3.86	22.37	27.07	8.004	0.172	570.0	20.71	0.102	0.274	1.800
.....	0.888	5.00	33.16	59.56	6.905	0.261	22.5	4.66	0.011	0.273	6.240
.....	0.112	3.93	18.53	1.66	9.495	0.140	531.0	19.68	0.095	0.235	1.320
.....	0.200	12.26	24.50	50.35	8.548	0.209	46.5	6.96	0.018	0.227	1.020
.....	0.424	9.12	24.75	60.33	8.495	0.216	28.5	3.98	0.011	0.227	0.472
.....	0.315	13.20	24.72	44.77	9.548	0.217	19.6	3.20	0.008	0.226	0.300
.....
.....	0.151	2.40	16.30	46.38	6.779	0.116	20.2	4.211	0.010	0.126	0.036
.....	0.341	1.00	14.80	40.16	7.065	0.113	0	0	0	0.113	0
.....	0.343	2.48	14.26	23.82	6.966	0.111	0	0	0	0.111	0

为了验证模糊综合评判法计算结果的正确性,建立综合得分与产能的关系图版(图 4),从图中可以看出,两者呈较明显的正比线性关系,说明综合评判法是可靠的,权重的分配也是非常合理的。

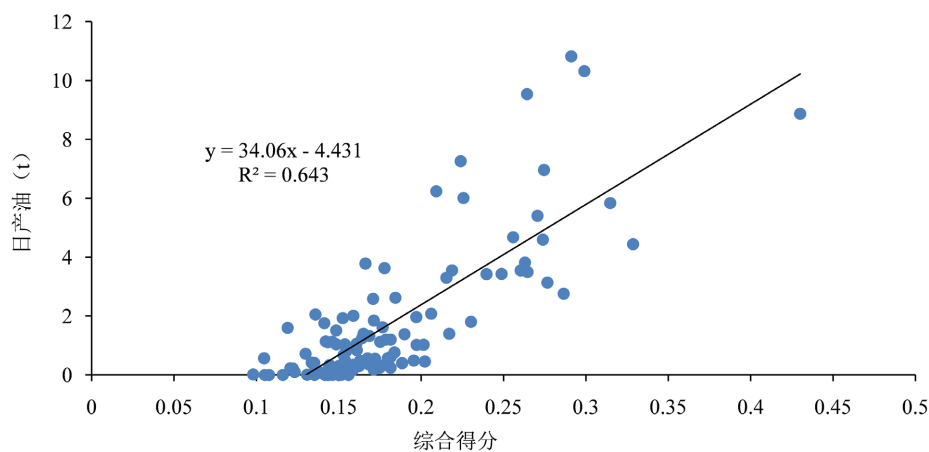


Figure 4. Relationship between comprehensive scores of influencing factors and oil production
图 4. 影响因素综合得分与产油量关系图

3.3. 低产井优选及应用效果

对大庆长垣的低产井统计发现,有 80% 以上的低产井试油年限较早,压裂规模较小或者没有压裂,工程因素得分较低是导致产油量小的最主要原因。因此我们针对低产井分别计算地质因素总得分和工程因素总得分,地质因素总得分较高但工程因素总得分低的井则可以通过加大压裂规模来提高产能,将低产井按地质因素总得分进行排序,共优选出 58 口潜力井可按照由好到差递进分批次开展老井二次试油(表 3)。

Table 3. Selected low production well location data**表 3.** 优选低产井井位数据

序号	井号	试油年限	日产油(t)	渗透率(mD)	有效厚度(m)	深侧向($\Omega \cdot m$)	含油饱和度(%)	水平应力差(MPa)	地质因素总得分	加液强度(m^3/m)	加砂强度(m^3/m)	工程因素总得分
1	a	1997	0.55	0.74	20.80	31.15	55.70	7.91	0.320	18.68	3.33	0.008
2	b	2006	0.21	0.31	17.10	18.77	50.75	7.27	0.248	0.00	0.00	0.000
3	c	1996	1.96	0.35	12.62	24.21	56.42	8.98	0.222	24.84	3.74	0.010
4	....	2004	1.40	2.39	7.00	20.82	59.29	6.70	0.348	18.94	3.27	0.008
5		2007	0.47	0.42	9.12	24.75	60.33	8.49	0.219	28.49	3.98	0.011
6		2003	1.02	0.20	12.26	24.50	50.35	8.55	0.211	46.54	6.96	0.018
7		1998	0.14	0.54	8.70	44.44	46.73	9.11	0.249	31.99	5.13	0.013
8		1996	2.58	0.24	9.70	26.52	51.13	9.73	0.189	25.38	4.17	0.011
9		2009	0.21	0.49	6.70	20.78	50.19	7.02	0.211	0.00	0.00	0.000
10		1991	0.33	0.20	13.88	20.34	35.75	10.08	0.177	21.35	3.81	0.010
11		1995	0.45	0.47	9.26	22.87	65.00	9.39	0.210	18.07	3.78	0.009
12		2010	0.61	7.78	4.20	19.85	51.83	5.68	0.334	23.30	3.58	0.009
13		2012	0.06	0.66	5.20	20.09	59.43	5.64	0.214	17.91	3.41	0.008
14		1994	0.30	0.20	10.26	21.84	46.75	9.51	0.178	16.55	3.49	0.008
15		2001	0.01	0.33	7.14	18.04	43.97	6.06	0.210	19.57	3.28	0.008
16		1979	0.00	1.01	5.80	10.89	52.30	7.50	0.213	0.00	0.00	0.000
17		2009	0.31	1.00	4.52	17.06	52.72	6.39	0.199	27.82	3.40	0.010
											
57	.....	2014	0.80	0.23	2.30	17.27	39.58	7.80	0.144	123.86	12.79	0.038
58	.....	2000	0.00	0.34	2.48	14.26	23.82	6.97	0.132	0.00	0.00	0.000

目前已重新试油一口 M402 井，加大压裂规模，日产油增至常规压裂产量的 10 倍(表 4)。

Table 4. Comparison of two oil testing parameters for well M402**表 4.** M402 井两次试油参数对比

井号	有效厚度(m)	深侧向($\Omega \cdot m$)	含油饱和度(%)	渗透率(mD)	水平应力差(MPa)	地质因素总得分	第一次试油			第二次试油		
							加砂强度(m^3/m)	加液强度(m^3/m)	日产油(t)	加砂强度(m^3/m)	加液强度(m^3/m)	日产油(t)
M402	11.60	56.40	58.91	0.57	7.54	0.26	4.31	25.6	0.65	53.06	589.50	6.96

3.4. 增产技术对策

弄清影响大庆长垣扶余油层致密油产能的七大主控因素，不仅能优选低产井开展二次试油，解放低产井产能，同时对下一步整体勘探思路提供了重要依据。针对七大主控因素，提出了 3 条提产增效措施：一是加强区域地质分析和地震属性砂体刻画，更精准锁定富油厚砂体；其次针对埋藏深，渗透性差，单

井无法获得产能的区域,开展直井和水平井结合勘探,直井探层,水平井提产;最后致密油要想获得高产能就必须重视发展储层改造技术,压裂规模的大小是获得产能的关键。

4. 结论

1) 对影响产能的控制因素开展定性分析和定量计算,首次运用灰色关联分析法对产能主控因素开展定量评价。确定主控因素依次为加液强度、加砂强度、渗透率、有效厚度、深侧向电阻率、含油饱和度及水平应力差。

2) 应用模糊综合评判法对低产井开展综合评价,优选出地质因素总得分较高但工程因素总得分低的井开展二次试油,通过加大压裂规模来解放低产井产能。

3) 依据产能主控因素,有针对性开展下一步勘探工作,并制定相应的增产措施:加强区域地质分析和地震属性砂体刻画;直井和水平井结合勘探;加大储层压裂改造规模。

4) 灰色关联和模糊综合评判法联合应用在致密油低产井分析评价中尚属首次,丰富了致密油低产井的分析和预测方法。

参考文献

- [1] 刘录祥,孙其信,王士芸. 灰色系统理论应用于作物新品种综合评估初探[J]. 中国农业科学, 1989, 22(3): 22-27.
- [2] 温兆麟,李德威. 模糊数学在综合评价水稻栽培方式中的应用[J]. 广西农业大学学报, 1998, 17(4): 360-364.
- [3] 王庆东,王宁. 模糊数运算在教学质量综合评判中的应用[J]. 商丘师范学院学报, 2009, 25(3): 45-47.
- [4] 赵政璋,杜金虎,邹才能,等. 致密油气[M]. 北京:石油工业出版社, 2012.
- [5] 李国会,康德江,姜丽娜,等. 松辽盆地北部扶余油层致密油成藏条件及甜点区优选[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(8): 1106-1113.
- [6] 刘坤,孙建孟,王艳. 致密油储层水平井压后产能预测研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(29): 88-95.
- [7] 孙芳芳. 浅议灰色关联度分析方法及其应用[J]. 科技信息, 2010, 2(17): 880-882.
- [8] 李俊键,姜汉桥,陈民锋,等. 聚合物驱效果影响因素关联性及其适应性分析[J]. 石油钻采工艺, 2008, 30(2): 85-87.
- [9] 孙娜,文华,卢继源,等. 灰色关联分析在高台子油田开发调整中的应用[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(3): 63-64.
- [10] 周生田. 灰色综合评判方法在评价油田注水效果中的应用[J]. 石油地质与工程, 2006, 20(6): 48-50.
- [11] 李柏年. 模糊数学及其应用[M]. 合肥工业大学出版社. 2007.