

· 储层改造与完井技术 ·

文章编号: 1004-4388(2023)06-0029-05

灰色关联法在储层改造效果因素分析中的应用

王坤杰

中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 四川德阳 618000

通讯作者: Email: wangkj587@ sinopec. com

引用: 王坤杰. 灰色关联法在储层改造效果因素分析中的应用[J]. 油气井测试, 2023, 32(6): 29-33.

Cite: WANG Kunjie. Application of gray correlation method in the analysis of reservoir transformation effect factors [J]. Well Testing, 2023, 32(6): 29-33.

摘要 桩 23 北区储层低孔、低渗, 自然投产效果差, 需进行高效压裂改造提高产能。从储层和施工参数两个方面确定了影响该区压裂改造效果的影响因素和影响因素的关联度及权重。采用灰色关联模糊层次分析法评价影响因素, 进一步明确了影响该区块改造效果的主控因素。研究结果表明: 影响该区块储层改造效果的主控因素为支撑剂和压裂液总量; 灰色关联模糊层次分析法能对该区 10 口井储层改造效果进行预测分析, 偏差率在 10% 以内。灰色关联模糊层次分析法对桩 23 北区储层改造参数预测和后期投产具有一定的指导意义。

关键词 桩 23 北区; 灰色关联; 储层改造效果; 模糊层次分析法; 高效压裂; 影响因素; 低孔低渗; 预测分析

中图分类号: TE357 **文献标识码:** A **DOI:** 10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2023. 06. 005

Application of gray correlation method in the analysis of reservoir transformation effect factors

WANG Kunjie

Downhole Operation Branch, Southwest Petroleum Engineering Co., Ltd., Sinopec, Deyang, Sichuan 618000, China

Abstract: The reservoir in the north of zhuang 23 has the characteristics of low porosity and low permeability, and the natural production effect is poor. It is necessary to improve the production capacity through fracturing transformation. In order to achieve efficient transformation, it is necessary to analyze and study the factors affecting the transformation. Under the premise of analyzing the fracturing and transformation well in this area, the correlation and weight of the influencing factors and influencing factors affecting the effect of fracturing transformation in this area are determined from two aspects: reservoir and construction parameters. The gray correlation fuzzy hierarchy analysis method is used to evaluate the influencing factors, and further clarify the main control factors affecting the transformation effect of the block. The research results show that: The main control factor affecting the transformation effect of the reservoir in this block is the total amount of support agent and fracturing fluid; The gray correlation fuzzy hierarchy analysis method can predict and analyze the transformation effect of the reservoir in this area, and there is a good linear correlation between the two. The conclusion is that the gray correlation fuzzy hierarchy analysis method has certain guiding significance for the prediction of reservoir transformation parameters in the north area of zhuang 23 and the later production.

Keywords: North area of zhuang 23; grey correlation; reservoir transformation effect; fuzzy hierarchy process; high-efficiency fracturing; influencing factors; low porosity and low permeability; predictive analysis

影响储层压裂改造效果的因素很多, 包括地层因素、施工参数以及裂缝参数等, 每一种因素对油井压裂后效果的影响程度不同, 因此对储层改造效果的分析往往需要进行多因素分析研究^[1-7]。灰色关联法是研究各种因素与目标关联度、量化各因素关联度的数学手段, 被广泛的应用到储层压裂改造效果分析等问题研究中^[8-13]。王香文等^[14]针对地层混乱匹配的现象, 提出 2 种虚拟关联度的改进方法, 现场应用效果良好。惠峰^[15]针对油田老井重复

压裂增油效果逐渐变差的难点, 应用灰色关联法对影响老井重复压裂的各个因素进行了定量计算分析, 找出影响压裂后效果的主控因素, 为后期老井重复压裂优选井层提供依据。程汉列等^[16]针对塔中奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层影响开发效果主要因素尚不明确的问题, 应用灰色关联法统计分析取得较好的效果。魏漪等^[17]针对长庆 G 油田 L 井区的典型低渗透油层评价难度大等问题, 应用模糊数学的方法, 筛选出了 5 个贡献最大的因子, 现场应用

符合率达 90% 以上。综上所述,模糊数学评价方法对于低孔、低渗油藏具有较好的适应性。桩 23 北区储层属于具有低孔、低渗特征油藏,因此地层因素主要考虑孔隙度和渗透率等因素,同时考虑加砂强度、施工排量等工程参数,建立各因素与油井压裂后产油量的关联度。

由于桩 23 北区各井的储层参数和施工参数存在一定差异,影响油井压裂后效果的诸多因素的优劣程度各不相同,因此需要对储层及施工情况分级后进行多因素的综合评价。层次分析方法作为一种将复杂问题分为若干层次并将定性和定量分析相结合的多因素分析法,没有考虑到分层判断中人为主观的模糊性,通过引入模糊数学的方式,可以克服其局限性^[18-19]。因此,在充分调研的基础上,采用模糊层次分析法对桩 23 北区储层改造效果的规律进行系统研究,并建立储层综合评分与压后油量的预测关系,符合客观实际,准确性高,有利于此区块的下一步压裂改造。

1 影响因素关联度及权重的确定

桩 23 北区大多采用分层压裂工艺对储层进行压裂改造,压裂后油井均有不同程度的效果。本文选择 10 口分层压裂井作为分析对象,以日产油量为目标,采用灰色关联法确定各因素的关联度及权重。

考虑的地层影响因素有:储层有效厚度(M1)、孔隙度(M2)和渗透率(M3)。

考虑的施工影响因素有:加砂强度(M4)、平均砂比(M5)、压裂液总量(M6)、支撑剂总量(M7)、最大排量(M8)。

为消除各影响因素量纲的影响,采用标准化变

换对数据进行处理,同时采用邓氏关联度法进行关联度和权重的计算。

$$X=(x(1),x(2),\cdots,x(n)) \tag{1}$$

$$xt(i)=(x(i)-\bar{x})/\sigma \tag{2}$$

式中: X 为样本编号; x 为样本序列 X 的各样本平均值; σ 为样本标准差; $xt(i)$ 为标准差标准化处理值, i 为样本编号。

关联系数计算式为

$$L_{0i}(k)=\frac{\min_i\min_k|x_0(k)-x_i(k)|+\rho\max_i\max_k|x_0(k)-x_i(k)|}{|x_0(k)-x_i(k)|+\rho\max_i\max_k|x_0(k)-x_i(k)|} \tag{3}$$

式中: $|x_0(k)-x_i(k)|$ 为第 k 点 x_i 与 x_0 的绝对误差 ($k=1,2,\cdots,n$; $i=1,2,\cdots,m$); $\min_i\min_k|x_0(k)-x_i(k)|$ 为两级最小差,其中, $\min_k|x_0(k)-x_i(k)|$ 是第一级最小差,表示在 $x_i(k)$ 序列上找各点与 $x_0(k)$ 的最小差,即跑偏 k 项最小者。 $\min_i\min_k|x_0(k)-x_i(k)|$ 为第二级最小差,表示在各序列找出的最小差基础上的有序列中的最小差,即跑偏 i 项最小者;

$\max_i\max_k|x_0(k)-x_i(k)|$ 为两级最大差,其中, $\max_k|x_0(k)-x_i(k)|$ 是第一级最大差,表示在 $x_i(k)$ 序列上找各点与 $x_0(k)$ 的最大差,即跑偏 k 项最大者。 $\max_i\max_k|x_0(k)-x_i(k)|$ 为第二级最大差,表示在各序列找出的最大差基础上的有序列中的最大差,即跑偏 i 项最大者; ρ 为分辨系数,取值为 0.5。

关联度计算式为

$$\gamma_{0i}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nL_{0i} \tag{4}$$

式(1)~式(4)可以计算桩 23 北区 10 口样本井的关联度及权重,具体结果详见表 1。

表 1 各影响因素关联度及权重计算结果
Table 1 Calculation results of correlation and weight of influencing factors

因素	M1/m	M2	M3/mD	M4/(m ³ ·m ⁻¹)	M5/%	M6/m ³	M7/m ³	M8/(m ³ ·min ⁻¹)
关联度	0.651 3	0.673 9	0.703 5	0.744 8	0.662 5	0.733 5	0.754 4	0.679 6
权重	0.116 6	0.119 3	0.126 7	0.132 6	0.122 1	0.127 5	0.130 6	0.124 6

2 压裂效果模糊层次综合评价及规律研究

根据桩 23 北区储层特点及工艺措施,结和相关数据统计,将评价参数分为四个等级,各影响分级详细区间(见表 2)。

因素集: $u=\{u_1,u_2,\cdots,u_n\}$

评价集: $v=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$

模糊权重向量: $A=\{a_1,a_2,\cdots,a_n\}$

隶属度函数是模糊层次分析中的基石,不同形式的隶属度函数计算出来的模糊事件概率存在较大,因此贴合实际的模糊层次分析需要选择合理的隶属度函数。

采用正态分布型隶属度函数

$$r(u)=e^{-[\frac{u-c}{d}]^2} \tag{5}$$

式中: u 为因素集中的元素, c 和 d 为指标参数。

表 2 影响因素分级区间
Table 2 Classification range of influencing factors

等级	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
A	40 ~ 50	15 ~ 20	15 ~ 20	4. 5 ~ 6. 0	21. 5 ~ 24. 0	370 ~ 450	45 ~ 55	5 ~ 6
B	30 ~ 40	10 ~ 15	10 ~ 15	3. 0 ~ 4. 5	19. 0 ~ 21. 5	290 ~ 370	35 ~ 45	4 ~ 5
C	20 ~ 30	5 ~ 10	5 ~ 10	1. 5 ~ 3. 0	16. 5 ~ 19. 0	210 ~ 290	25 ~ 35	3 ~ 4
D	10 ~ 20	0. 01 ~ 5	0. 1 ~ 5	0 ~ 1. 5	14. 0 ~ 16. 5	130 ~ 210	15 ~ 25	2 ~ 3

当 u 和 c 相等时,隶属度最大,对于不同的等级而言, c 的值应为等级上下限的均值。而当某一因素处于两个等级的分界点时,其对上下两个不同等级的隶属度应该相同,取分界点的隶属度为 0. 5,因此获取指标参数 c 和 d 的表达式。

$$c = (l_1 + l_2)/2 \tag{6}$$

$$d = \sqrt{(l_1 - l_2)^2/4\ln2} \tag{7}$$

式中: l_1 、 l_2 为等级区间的上、下限值。

通过隶属度计算获得单一因素在各个等级区间的隶属度矩阵,即

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n1} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

综合评价向量:

$$B = \{b_1, b_2, \cdots, b_m\} = A \cdot R \tag{8}$$

表 3 X432 井各影响因素隶属度计算结果
Table 3 X432 calculation results of the degree of membership of influencing factors

影响因素	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
	22. 40	4. 87	8. 88	2. 70	22. 53	296. 49	34. 38	4. 50
A	0. 000 0	0. 000 0	0. 000 3	0. 000 3	0. 978 4	0. 003 8	0. 001 1	0. 062 5
B	0. 012 3	0. 001 6	0. 232 9	0. 255 0	0. 001 7	0. 614 7	0. 415 9	1. 000 0
C	0. 829 1	0. 464 1	0. 810 8	0. 781 9	0. 000 0	0. 392 1	0. 588 2	0. 062 5
D	0. 219 1	0. 536 6	0. 011 0	0. 009 4	0. 000 0	0. 001 0	0. 003 2	0. 000 0

二级评价权重为

$$A = [A_1 \ A_2] = [0. 362 \ 6 \ 0. 637 \ 4]$$

由公式(8)计算 x432 井的综合评价向量。

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0. 000 \ 0 & 0. 031 \ 1 & 0. 254 \ 8 & 0. 091 \ 0 \\ 0. 127 \ 9 & 0. 291 \ 3 & 0. 238 \ 3 & 0. 001 \ 8 \end{bmatrix}$$

$$B = A \cdot R = [0. 081 \ 5 \ 0. 197 \ 0 \ 0. 244 \ 3 \ 0. 034 \ 1]$$

由公式(9)计算 x432 井模糊综合评分为

$$y = \frac{\sum_{i=1}^4 (b_i \cdot v_i)}{\sum_{i=1}^4 b_i} = 64. \ 63$$

式中: b_m 为被评价对象从整体上看 v_n 等级模糊子集的隶属程度。

模糊综合评分为

$$y = \sum_{i=1}^m (b_i \cdot v_i) / \sum_{i=1}^m b_i \tag{9}$$

v_i 对应于等级 A、B、C、D 的评分值分别为 100、75、50、25。

以 X432 井为例,计算综合评分值,其隶属度计算结果详见表 3。

分别考虑地层因素和施工因素的影响,通过灰色关联理论计算的两级权重如下:

一级评价权重为

$$\begin{aligned} A_1 &= [M_1 \ M_2 \ M_3] \\ &= [0. 116 \ 6 \ 0. 119 \ 3 \ 0. 127 \ 6] \\ A_2 &= [M_4 \ M_5 \ M_6 \ M_7 \ M_8] \\ &= [0. 132 \ 6 \ 0. 122 \ 1 \ 0. 127 \ 5 \ 0. 130 \ 6 \ 0. 124 \ 6] \end{aligned}$$

同理,可以计算出 10 口样本井的模糊综合评分值,详见表 4。

表 4 模糊层次综合评价结果
Table 4 Comprehensive evaluation results of fuzzy level

井号	模糊评分	压后日产油量/(t·d ⁻¹)
17-X30	76. 58	7. 0
X414	67. 38	5. 2
X412	50. 78	2. 0
X103	61. 69	5. 9
X433	72. 30	3. 8
X411	62. 49	3. 1
X426	51. 04	2. 9
X432	64. 63	5. 5
X423	89. 55	7. 6
X413	90. 83	7. 3

从图 1 可以看出,储层改造后日产油量与模糊

层次综合评分有明显的正相关关系。评分值越高,储层质量越好,改造效果越好。通过线性回归可以得到预测压后日产油量的关系方程,相关系数 $r=0.8465$ 。

$$T=0.1211S-3.2955$$

(10)

式中, T 为储层压裂后日产油量, t/d ; S 为模糊层次综合评分值。

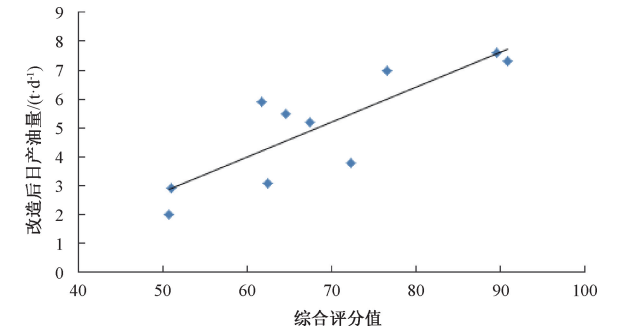


图1 模糊层次综合评价结果与改造效果关系

Fig.1 The relationship between the comprehensive evaluation results of the fuzzy hierarchy and the transformation effect

3 改造效果预测与检验

对桩23北区17-X30等10口井按照上述方法进行了预测和检验,通过对地层和施工参数的模糊层次分析可以得到各井的综合评分值,由回归公式计算得到预测压裂后日产油量(如表5所示),各井偏差率基本在10%以内,该方法对于该区域有较好的适应性。

表5 模糊评价结果及实际结果对比

Table 5 Comparison of Fuzzy Evaluation Results and Actual Results				
井号	模糊评分	预测日产油量/($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	压后日产油量/($\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$)	偏差率/%
17-X30	76.58	7.57	7.0	8.14
X414	67.38	5.41	5.2	4.04
X412	50.78	2.19	2.0	9.50
X103	61.69	6.33	5.9	7.29
X433	72.30	4.08	3.8	7.37
X411	62.49	3.32	3.1	7.10
X426	51.04	3.23	2.9	11.38
X432	64.63	5.69	5.5	3.45
X423	89.55	7.72	7.6	1.58
X413	90.83	7.41	7.3	1.51

4 结论

(1)桩23北区压裂效果影响因素中,通过灰色关联法分析可知加砂强度、支撑剂和压裂液总量对储层改造效果影响较大。

(2)基于模糊层次分析理论对桩23北区10口井储层改造效果的规律性研究所获得的模糊综合评分值与压裂后日产油量关系与客观实际相吻合,偏差率基本在10%以内,该方法对于该区域有较好的适应性。对后期储层的压裂改造提供了一定的指导意义。

致谢:感谢中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司同意本文公开发表。

参考文献

[1] 张家伟,刘向君,熊健,等.基于离散元法的砾岩水力压裂裂缝扩展规律及主控因素[J].大庆石油地质与开发,2023,42(3):48-57.

ZHANG Jiawei, LIU Xiangjun, XIONG Jian, et al. The law of the expansion of conglomerate hydraulic fracturing cracks based on the discrete element method and the main control factors [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(3):48-57.

[2] 王建波,冯明刚,严伟,等.焦石坝地区页岩储层可压裂性影响因素及计算方法[J].断块油气田,2016,23(2):6-10.

WANG Jianbo, FENG Minggang, YAN Wei, et al. Factors affecting the fracturing properties of shale reservoirs in the coke dam area and calculation methods [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(2):6-10.

[3] 王瑞.致密油藏水平井体积压裂效果影响因素分析[J].特种油气藏,2015,22(2):126-128.

WANG Rui. Analysis of factors affecting the volume fracturing effect of horizontal wells in dense reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(2):126-128.

[4] 周祥,张士诚,邹雨时,等.致密油藏水平井体积压裂裂缝扩展及产能模拟[J].西安石油大学学报(自然科学版),2015,30(4):53-58.

ZHOU Xiang,ZHANG Shicheng,ZOU Yushi,et al. Simulation of fracture propagation and productivity of volume fracturing horizontal well in tight oil reservoirs [J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition),2015,30(4):53-58.

[5] 刘建宁.油井水力压裂效果影响因素分析[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2021(5):17-21.

LIU Jianning. Analysis of factors affecting the hydraulic fracturing effect of oil wells [J]. Chinese Science and Technology Journal Database (Full Text Version) Engineering Technology, 2021 (5):17-21.

[6] 赵红兵.致密油藏体积压裂水平井产能主控因素评判技术研究[D].西安:西安石油大学,2021:34-38.

ZHAO Hongbing. Research on evaluation technology of main control factors for production capacity of horizontal wells in volume fracturing of tight oil reservoirs [D]. Xi'an:Xi'an University of Petroleum, 2021:34-38.



- [7] 王玲. 中孔低渗复杂断块油藏压裂效果评价及影响因素分析[J]. 非常规油气, 2019, 6(6): 95-99.
WANG Ling. Evaluation of fracturing effect and analysis of influencing factors of complex fault reservoir with low permeability and middle hole [J]. Unconventional Oil & Gas, 2019, 6(6): 95-99.
- [8] 诸兵, 郭海湘. 储层含油性识别的数据驱动灰色关联预测方法[J]. 统计与决策, 2008, 12(23): 49-52.
ZHU Bing, GUO Haixiang. Data-driven gray association prediction method for reservoir oil identification [J]. Statistics & Decision, 2008, 12(23): 49-52.
- [9] 万晓伟, 毕建霞, 刘志远, 等. 灰色关联网格化综合评价普光气田储层[J]. 断块油气田, 2010, 17(4): 43-48.
WAN Xiaowei, BI Jianxia, LIU Zhiyuan, et al. Grey correlation grid comprehensive evaluation of the reservoir of the general light gas field [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2010, 17(4): 43-48.
- [10] 张雄君, 程林松, 李春兰. 灰色关联分析法在产量递减率影响因素分析中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(6): 48-50.
ZHANG Xiongjun, CHENG Linsong, LI Chunlan. Application of grey correlation analysis in the analysis of factors affecting the decreasing yield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(6): 48-50.
- [11] 易地生. 灰色理论与方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992: 92-96.
- [12] 王云川, 周玉龙, 袁浩仁, 等. 基于灰色关联法的滨 425 区块压裂效果影响因素分析[J]. 油气井测试, 2021, 30(1): 73-78.
WANG Yunchuan, ZHOU Yulong, YUAN Haoren, et al. Analysis on influencing factors of fracturing effect in Bin 425 block based on grey correlation method [J]. Well Testing, 2021, 30(1): 73-78.
- [13] 闫文华, 暴赫, 司想, 等. 基于灰色关联法的水平井压裂参数优化研究[J]. 数学的实践与认识, 2021, 51(2): 145-151.
YAN Wenhua, BAO He, SI Xiang, et al. Optimization of fracturing parameters in horizontal wells based on grey correlation method [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2021, 51(2): 145-151.
- [14] 王香文, 杜明亮, 于文芹. 灰色关联法在地层对比中的应用及其改进[J]. 测井技术, 2006, 30(2): 126-128.
WANG Xiangwen, DU Mingliang, YU Wenqin. Application and improvement of gray correlation method in stratigraphic comparison [J]. Well Logging Technology, 2006, 30(2): 126-128.
- [15] 惠峰. 灰色关联法在老井重复压裂选井中的应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(14): 117-118.
HUI Feng. Application of gray correlation method in repeated fracturing well selection in old wells [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(14): 117-118.
- [16] 程汉列, 王连山, 李林, 等. 灰色关联法分析塔中油气藏开发效果影响因素[J]. 中外能源, 2016, 21(11): 44-47.
CHENG Hanlie, WANG Lianshan, LI Lin, et al. Grey correlation method analyzes the factors affecting the development effect of oil and gas reservoirs in the tower [J]. Sino-Global Energy, 2016, 21, (11): 44-47.
- [17] 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): 117-119.
WEI Yi, ZHAO Guoxi, ZHOU Wenge, et al. Application of fuzzy mathematical method in the comprehensive evaluation of low permeability reservoirs in Changqing Oilfield [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(1): 117-119.
- [18] 张辉, 高德利. 基于模糊数学和灰色理论的多层次综合评价方法及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2008(3): 1-6.
ZHANG Hui, GAO Deli. Multi-level comprehensive evaluation method is based on the fuzzy mathematics and grey theory [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008(3): 1-6.
- [19] HU J, LIU Z B, ZOU K Q. Comprehensive evaluation model of grey fuzzy on oilfield development program [J]. Key Engineering Materials, 2011, 474-476: 484-489.

编辑 吴志力

第一作者简介: 王坤杰, 男, 1992 年出生, 工程师, 硕士学位, 2018 年毕业于西南石油大学油气田开发专业, 现从事增产改造方面工作。电话: 13882196701; Email: wangkj587@sin-opec.com。通信地址: 四川省德阳市金沙江西路 699 号, 邮政编码: 618000。