

# Fuzzy Comprehensive Evaluation of Development Effect in Pingqiao Infilling Area of Ansai Oilfield

Yong Wang<sup>1\*</sup>, Ting Zhang<sup>2#</sup>, Weilei Yang<sup>1</sup>, Xiaofei Wang<sup>1</sup>, Zhi Xu<sup>1</sup>, Tao Zhao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geological Office of No.1 Oil Production Plant of Changqing Oilfield Company, Yanan Shaanxi

<sup>2</sup>School of Geosciences and Engineering of Xi'an University of Petroleum, Xi'an Shaanxi

Email: #1632992324@qq.com

Received: Sep. 1<sup>st</sup>, 2019; accepted: Nov. 12<sup>th</sup>, 2019; published: Nov. 19<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

According to the characteristics of water-driven development in low-permeability reservoir, the development parameters such as production decline rate, recovery rate of remaining recoverable reserves, water cut rise rate, water storage rate, water consumption rate, water drive volume sweep coefficient, etc. are selected to evaluate the development effect of five kinds of infill well patterns in Pingqiao area of Ansai Oilfield by using the fuzzy comprehensive evaluation method. The evaluation results show that the method is simple, convenient and reliable. It is widely used in other low permeability reservoir infilling areas.

## Keywords

Infilling Area, Fuzzy Comprehensive Evaluation, Development Effect Evaluation

---

# 安塞油田坪桥加密区开发效果模糊综合评价

王 勇<sup>1\*</sup>, 张 婷<sup>2#</sup>, 杨维磊<sup>1</sup>, 王晓飞<sup>1</sup>, 徐 志<sup>1</sup>, 赵 涛<sup>1</sup>

<sup>1</sup>长庆油田分公司第一采油厂地质所, 陕西 延安

<sup>2</sup>西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安

Email: #1632992324@qq.com

收稿日期: 2019年9月1日; 录用日期: 2019年11月12日; 发布日期: 2019年11月19日

---

\*第一作者。

#通讯作者。

## 摘要

针对低渗透油藏水驱开发特征,选取产量递减率、剩余可采储量采油速度、含水上升率、存水率、耗水率、水驱体积波及系数等开发参数,运用模糊综合评价方法,对安塞油田坪桥区5种加密井网开发效果进行评价。评价结果表明该方法简单方便、可信度较高,可推广应用到其它低渗透油藏加密区。

## 关键词

加密区,模糊综合评判,开发效果评价

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

我国从 20 世纪 50 年代以来,开始进行水驱开发效果研究,经过几十年的发展,形成了多种评价方法,大多通过确定一个或多个评价指标并与给定的评价标准进行对比,或者采取将几个评价指标联立并运用数学方法进行综合评判等手段来评价开发效果[1] [2] [3]。各种文献已给出许多具体的水驱评价指标,一些指标之间具有相关性,关系复杂,而另一些指标又相互独立。每个评价指标均有其局限性,一般只能反映注水开发某一方面的问题,或者只适用于油田开发的某一阶段,总体来看,对水驱开发效果的评价缺乏系统性、全面性和科学性。发展趋势是用各种数学方法,如模糊数学、运筹学、多元统计分析、系统分析等方法对各种指标进行综合评价,张继风等学者认为模糊综合评判方法在理论上及应用上较为成熟[4]。本文从低渗透储层的开发特征出发,提出产量递减率、剩余可采储量采油速度、含水上升率、存水率等 6 个参数作为开发效果评价分类的主要参数,并运用模糊数学理论对其进行综合评价。

## 2. 油藏概况

安塞油田坪桥区属于超低渗裂缝性油藏,且砂体展布方向与最大主应力方向不一致,历经 20 多年注水开发,平面、剖面水驱矛盾加剧。自 1997 年起,开始探索合理的加密布井方式,目前形成了 5 种加密井网(图 1),其中针对裂缝主向油井水淹,侧向油井见效程度低,长期低压低产,侧向剩余油富集的特点,为建立有效压力驱替系统,动用剩余油,自 2000 年起在裂缝两侧通过缩小排距至 125 m 左右进行加密,井网形式由 250 × 250 m 正方形反九点井网转换为排距 120~130 m 排状井网。

开发实践表明,不同加密井网开发动态表现出一定的差异性,需要对加密井网开发效果进行准确、全面的评价。其中:加密方式 1、方式 2 受裂缝影响导致主向井快速水淹,形成明显的水线,主向井压力保持水平较高(大于 120%),侧向部分井已见水,压力也保持在较高水平(100%左右);加密方式 3 油井加密后,短期内产量上升明显,但侧向井见效不明显,与新投注水井未建立起有效压力驱替系统,加上供水不足影响,导致整体呈递减趋势;加密方式 4 实施后,加密井与侧向老井均保持了较高的地层压力水平,尤其在井组水线北侧的加密井能量充足,注采井间渗流状况良好;加密方式 5 南部储层物性较差,部分油藏动用状况较差,压力保持水平低,且逐年下降。

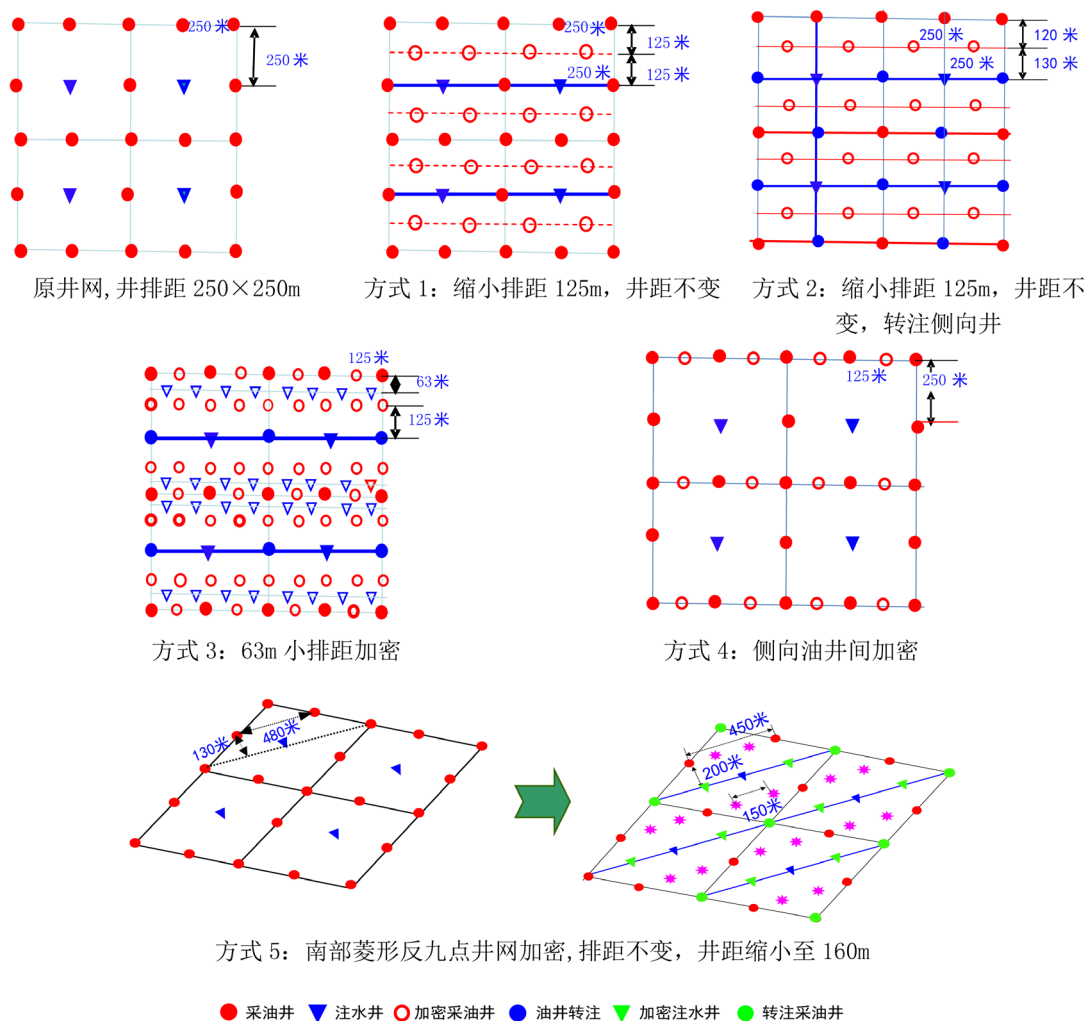


Figure 1. Schematic diagram of five kinds of infilling patterns in Pingqiao area  
图 1. 坪桥区 5 种加密井网模式示意图

### 3. 模糊综合评价方法

#### 3.1. 评价指标选择

综合递减率反映了某一阶段油田在原有的注采系统下油田地下油水的运动规律和分布状况及生产动态特征, 是油田开发效果的综合反映, 是研究油藏开发规律的重要概念和指标, 井网加密后产量递减是否合理, 影响着对加密效果以及油藏开发的决策调整, 因此综合递减率较其它单因素应该最重要之一; 含水上升率反映水驱开发油田的含水上升速度, 是关系到油田稳产期长短和开发效果的主要技术问题, 是油田开发调整控水效果的直接反映, 所以它应该作为重要指标之一; 采油速度是表示油田开发快慢的指标, 同样反映了油田的综合开发效果; 存水率的内涵是注入水能够起到维持地层能量作用的效率, 当油藏无产水量时存水率最大值为 1.0, 在理想状况下存水率越大, 累计注入的水量中就有更多的部分停留在地层中, 在一定的油藏压力和边界条件下, 会使注入水波及体积增大, 保持较高的地层能量, 开发效果也就越好, 它的内涵体现了注水利用率, 与注采比存在因果关系。根据低渗透油田井网加密调整后的开发特征, 在开发效果评价中保留了存水率这一指标; 耗水率是指每采出 1 t 原油所伴随采出的水量, 衡量注入水利用率的一个重要指标, 可以作为油田开发的指标。

将以上单因素评价指标归纳起来，即可得到 6 个单因素分类界限，如表 1 所示。

**Table 1.** Physical significance and classification of development indicators  
**表 1.** 开发指标物理意义及等级划分

参数	物理意义	参数等级标准			
		一类	二类	三类	四类
剩余可采储量采油速度 V (%)	当年核实年产油量除以上年末的剩余可采储量的值	$V > 5$	$4 < V \leq 5$	$2 < V \leq 4$	$V \leq 2$
存水率 W	未采出的累积注水量与累积注水量之比	$W > 0.8$	$0.5 < W \leq 0.8$	$0.3 < W \leq 0.5$	$W \leq 0.3$
水驱波及体积系数 P	在水驱开发条件下水侵占据的孔隙体积与油藏原始孔隙体积之比	$P > 0.6$	$0.4 < P \leq 0.6$	$0.2 < P \leq 0.4$	$P \leq 0.2$
综合递减率 D (%)	单位时间产量递减的百分数	$D < 5$	$5 \leq D < 10$	$10 \leq D < 15$	$D \geq 15$
含水上升率 F	每采出 1% 的地质储量后含水率的上升值	$F < 0.5$	$0.5 \leq F < 1$	$1 \leq F < 1.5$	$F \geq 1.5$
耗水率 H	每采出 1 t 原油所伴随采出的水量	$H < 1.0$	$1.0 \leq H < 2.0$	$2.0 \leq H < 3.0$	$H \geq 3.0$

### 3.2. 模糊评价原理及方法

模糊综合评判是应用模糊变换原理，在多因素的参与下得到一个综合评语，再通过构造数学模式将评语转换为一个综合评价值，并根据这个综合评价值对水驱开发效果进行分类[5]。

模糊综合评价一般有三个基本要素集，因素集  $U$ 、评价集  $V$  和权重集  $\omega$ 。

其中，因素集  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  刻画了评价对象的  $n$  种因素， $n$  为参数个数；评语集  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$  刻画了每一因素所处的状态的  $m$  种决断(即评价等级)， $m$  为等级数；

评价思路主要是：

- 1) 确定进行评价对象；
- 2) 确定导致评价结果的各因素所组成集合；
- 3) 确定评价结果组成评价分级集合；
- 4) 确定各因素对评价分级的影响程度集合；
- 5) 确定模糊综合评价结果。

根据 5 种加密区的剩余可采储量采油速度、存水率、水驱波及体积系数、综合递减率、含水上升率、耗水率等实际指标，可得：

$$V = \{125 \text{ m排间}, 125 \text{ m排间} + \text{转注}, \text{南部菱形反九点加密}, 63 \text{ m小排距}, \text{油井间加密}\}$$

$$= \begin{Bmatrix} 0.058 & 0.91 & 0.10 & 0.207 & 2.95 & 2.25 \\ 0.032 & 0.97 & 0.12 & 0.289 & 7.50 & 3.20 \\ 0.031 & 0.90 & 0.11 & 0.299 & 1.05 & 3.57 \\ 0.046 & 0.90 & 0.23 & 0.167 & 0.65 & 2.90 \\ 0.036 & 0.91 & 0.21 & 0.10 & 0.54 & 2.78 \end{Bmatrix}$$

$U$  上的模糊子集  $\omega$  为各评价因素的权重分配，组成权重集  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ ，且  $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ ，权重代表不同参数的重要程度。

$$\omega = \{0.10, 0.10, 0.20, 0.30, 0.20, 0.1\}$$

$$\text{此时, } U \text{ 对 } V \text{ 的隶属分布构成评判矩阵: } R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \cdots & r_{1,m} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \cdots & r_{2,m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n,1} & r_{n,2} & \cdots & r_{n,m} \end{bmatrix} \quad (1)$$

125 m 排间加密、125 m 排间加密 + 转注、南部菱形反九点加密、63 m 小排距加密、油井间加密井网的评判矩阵分别为  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ :

$$R_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.75 & 0.25 & 0 \end{bmatrix}, R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.6 & 0.4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.45 & 0.55 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.1 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_4 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.85 & 0.15 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1 \end{bmatrix}, R_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.8 & 0.2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.95 & 0.05 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 \\ 0.08 & 0.92 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.78 & 0.22 \end{bmatrix}$$

将  $R$  看成是一系列横向量的集合, 每一横向量表示某一参数对评语集的隶属状况, 通常通过取一定的隶属度函数来计算。模糊矩阵  $R$  的求取是模糊评价的主要工作之一。

计算模糊综合评语  $P$ , 模糊综合评判模式为:

$$P = \omega \cdot R = (p_1, p_2, \cdots, p_m) \quad (2)$$

根据最大隶属度原则, 评语向量最大点  $P_{\max} = \max_{j=1}^m P_j$  所对应的  $j$  级就是对象最后的评语。

**Table 2.** Comprehensive evaluation of development effect of infilling area

**表 2.** 加密区开发效果综合评价

分类	一类	二类	三类	四类
综合评价价值 $y$	$0.7 < y \leq 1$	$0.4 < y \leq 0.7$	$0.2 < y \leq 0.4$	$y \leq 0.2$
评价结果	加密可获得高产量, 开发效果好	加密可获得较高产量, 开发效果较好	加密后开发效果一般	加密后开发效果差

最大隶属度原则忽略了  $P_{\max}$  之外的其它隶属度的作用, 很多时候这是不可取的, 为了综合反映所有隶属度的作用, 可建造一个水驱开发综合判别式, 将向量  $P$  转化为一个综合评价价值(表 2):

$$y = x \cdot P^T \quad (3)$$

$$P = \begin{bmatrix} 0.20 & 0.08 & 0.03 & 0.70 \\ 0.10 & 0.00 & 0.06 & 0.84 \\ 0.10 & 0.02 & 0.23 & 0.66 \\ 0.20 & 0.20 & 0.26 & 0.34 \\ 0.12 & 0.18 & 0.50 & 0.20 \end{bmatrix}$$

其中,  $y$  为模糊评价综合评价值,  $x$  为评价集合级别的等级转换矩阵, 一般取自然数的降级(或升级)序列。

取综合评语的等级转换向量序列  $x = (1, 0.67, 0.33, 0)$ 。由模糊综合评价值可进一步地提升评价开发效果。

### 3.3. 开发效果综合评价

125 m 排间加密井网加密后 1 年, 利用模糊层次综合评判结果, 得到综合评价向量  $W = \{0.20, 0.08, 0.03, 0.70\}$ , 目前开发效果模糊综合评价值为 0.26, 为三类开发水平, 加密开发效果一般, 需采取开发调整措施。同样, 对其它 4 种加密井网开发效果进行评价, 125 m 排距 + 转注加密、63 m 小排距加密、侧向油井间加密、南部菱形反九点加密区综合评价值分别为 0.12、0.42、0.40、0.19, 评价等级分别为四类、二类、二类、四类(表 3)。

**Table 3.** Development effect evaluation of five kinds of infilling pattern

**表 3.** 5 种加密井网开发效果评价表

加密井网	剩余可采储量采油速度	存水率	水驱波及系数	综合递减率	含水上升率	耗水率	综合评价	评价等级
125 m 排间加密	0.058	0.91	0.10	0.207	2.95	2.25	0.26	三类
125 m 排间 + 转注	0.032	0.97	0.12	0.289	7.5	3.2	0.12	四类
南部菱形反九点加密	0.031	0.90	0.11	0.299	1.05	3.57	0.19	四类
63 m 小排距	0.046	0.90	0.23	0.167	0.65	2.90	0.42	二类
油井间加密	0.036	0.91	0.21	0.10	-1.1	2.78	0.40	二类

考虑不同加密井网加密区域及加密时间差异性, 对比分析加密后 1 年各加密区的开发指标变化, 从表 4 可以看出, 5 种加密加密井网水驱动用程度都有一定程度提高, 其中 125 m 排间加密、63 m 小排距加密、侧向油井间加密的水驱动用程度较高, 大于 75.0%, 存水率大于 90.0%, 水驱效果较好; 从加密井投产后见效周期看, 125 m 排间加密、125 m 排间加密 + 转注的加密方式由于加密阶段较早, 见效周期较长, 63 m 小排距加密、侧向油井间加密井网则由于排距进一步缩小, 侧向水驱波及范围扩大, 导致见效周期低于 10 个月, 见效快; 63 m 小排距加密、侧向油井间加密压力恢复速度加快, 且压力保持水平在 100%左右, 地层能量充足。

因此, 63 m 小排距加密、侧向油井间加密整体加密效果好于其它加密井网, 而 125 m 排间加密 + 转注、南部菱形反九点加密整体加密效果较差(表 4), 这与本文采用的模糊综合评价结果一致。

**Table 4.** Statistics of development in one year after infilling of different well patterns

**表 4.** 不同井网加密后 1 年开发状况统计表

井网形式	水驱动用程度(%)			加密井见效		存水率(%)	压力状况	
	加密前	加密后	提高幅度	见效周期(月)	1 年递减(%)		压力恢复速度(MPa/月)	压力水平(%)
125 m 排间加密	67.7	75.8	8.1	24.1	34.8	0.91	0.0110	83.1
125 m 排间加密 + 转注	68.8	73.7	4.8	15.8	40.4	0.97	0.0139	81.9
63 m 小排距加密	71.6	79.0	7.4	4.5	23.3	0.90	0.0305	102.3
侧向油井间加密	69.5	77.4	7.9	10	39.5	0.91	0.0118	106.0
菱形反九点井网加密	55.1	61.8	6.7	12.7	36	0.90	0.0194	71.0

### 3.4. 结论

1) 低渗透油田开发加密效果评价需要综合多个参数对油田做出整体的评价, 确定了产量递减率、剩余可采储量采油速度、含水上升率、存水率、耗水率、水驱体积波及系数共 6 个开发指标对低渗透油田水驱开发效果进行评价。

2) 利用模糊综合评价方法对坪桥区 5 种加密井网开发效果进行评价, 评价结果表明 63 m 小排距加密、侧向油井间加密整体开发效果较好, 属于二类水平。

3) 对 5 种加密井网的综合评价结果与实际开发效果基本相符, 表明运用模糊综合评价方法评价低渗透油藏加密效果是可行的, 可推广应用到其它同类型油藏。

### 参考文献

- [1] 康晓珍, 张德强, 任雪艳. 油田注水开发效果评价方法研究[J]. 辽宁化工, 2011, 40(11): 1151-1152.
- [2] 李洪海, 许卫华. 定量评价注水开发效果的一种新方法[J]. 油气井测试, 2003, 12(2): 20-21.
- [3] 孙娜. 低渗透油藏水驱开发效果综合评价方法研究与应用[J]. 特种油气藏, 2008, 15(6): 56-58.
- [4] 张继风. 水驱油田开发效果评价方法综述及发展趋势[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(3): 118-121.
- [5] 李安贵, 张志宏. 模数数学及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005, 125-147.