

文章编号:1673-5005(2009)03-0090-05

# 基于灰色关联度的低渗透氮气驱评价模型

刘仁静<sup>1</sup>, 刘慧卿<sup>1</sup>, 李秀生<sup>1</sup>, 刘怀增<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学 石油工程教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中海石油有限公司 天津分公司, 天津 300452)

**摘要:**从氮气驱油机理出发,对影响注气效果的因素进行系统分析,筛选出具有较强分类特征的油藏参数,并对各参数的技术界限进行评价。基于灰色关联度理论,以油藏参数的灰色关联度确定指标客观权重,以目标油藏的加权灰色关联度作为评判矩阵,建立新的适合于低渗透油藏氮气驱潜力评价的多属性评价模型。实例应用结果表明,该模型是实用和有效的,能客观地反映目标油藏氮气驱的开发潜力,提高油藏评价的准确性,降低油藏选择的盲目性,可用于指导低渗透油藏氮气驱的合理开发及风险评估。

**关键词:**氮气驱; 灰色关联度; 权重; 评价模型

**中图分类号:**TE 357.45 **文献标识码:**A

## Evaluation model of nitrogen gas flooding in low permeability reservoir based on grey relation grade

LIU Ren-jing<sup>1</sup>, LIU Hui-qing<sup>1</sup>, LI Xiu-sheng<sup>1</sup>, LIU Huai-zeng<sup>2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
2. CNOOC Tianjin Branch Company, Tianjin 300452, China)

**Abstract:** Based on the nitrogen gas flooding mechanism, the influence factors on gas injection effect were analyzed. Several better-classification parameters were screened out, and the technical threshold value of each parameter was evaluated. Based on the grey relation grade theory, the objective weights of evaluation indexes were determined by grey relation grade of reservoir parameters. And a new multi-attribute model evaluating the potential of nitrogen gas flooding in low permeability reservoir was presented by taking the weighted grey relation degree of target reservoirs as the evaluation criteria. The applied results show that the model is practicable and effective, which can give right potential order among the candidate reservoirs for nitrogen gas flooding, improve the accuracy of reservoir evaluation, and thus reduce blindness of reservoir selection. This model can be used to guide reasonable development and risk assessment of nitrogen gas flooding in low permeability reservoir.

**Key words:** nitrogen gas flooding; grey relation grade; weight; evaluation model

注气不受矿化度的影响,能解决注水困难或水敏性油藏的许多问题,尤其在低渗透油田开发方面优势明显<sup>[1-2]</sup>,但其开发效果受地质参数、注入气体以及注气工艺等多方面的影响。国内外学者提出了不同的气驱评价方法,但是这些方法所选参数不够全面,而且包含了一些派生参数,主要采用主观赋值的方法确定权重,降低了指标的客观性及准确性<sup>[3-5]</sup>。笔者针对低渗( $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < k < 50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )油藏,对影响注气开发效果的因素进行分

析,在数理统计的基础上,对评价参数进行相关性分析,剔除派生参数并具体量化,引入灰色关联度理论,运用因素的灰色关联度确定指标的客观权重,以目标油藏的加权灰色关联度作为评价准则建立多属性评价模型。

## 1 氮气驱影响因素及指标参数的选取

通过对流态、界面张力、流度效应、润湿性影响重力影响、最小混相压力影响等进行分析,确定了影

收稿日期:2009-03-04

基金项目:国家科技支撑计划项目(2007BAB17B05);教育部新世纪优秀人才资助项目(NCET-06-0089)

作者简介:刘仁静(1982-),男(汉族),四川广安人,博士研究生,主要从事渗流机理及提高采收率研究。

响低渗透油藏气驱的主要因素:储层厚度  $H$ , 地层原油黏度  $\mu$ , 地面原油重度  $\gamma_o$ , 孔隙度  $\varphi$ , 油藏温度  $T$ , 油藏深度  $D$ , 当前含油饱和度  $S_o$ , 溶解气油比  $R_s$ , 体积系数  $B_o$ , 非均质性  $V_k$ , 润湿性  $I_{wet}$ , 油藏倾角  $\theta$ 。在这些特征参数中,有部分分类指标参数在数据结构上具有某种相似性。这种相似参数的出现,不仅会造成分类计算工作量的增加,而且会干扰分类的准确性。对此,采用相关系数的判定准则删除派生参

数,使所选的特征参数具有较好的独立性。通过SPSS 统计分析软件,得出以上特征参数的相关系数矩阵(表1)。由于最后3个特征参数缺乏充足的数据,无法作相关性分析,但通过理论分析并依据现场经验认为是相互独立的。给定阈值0.8,剔除派生参数油藏温度、体积系数、地层原油重度,最后确定了9个指标参数。

表1 各特征参数的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of characteristic parameters

	$\varphi$	$S_o$	$D$	$H$	$T$	$\gamma_o$	$\mu$	$B_o$	$R_s$
$\varphi$	1								
$S_o$	-0.083	1							
$D$	-0.237	0.230	1						
$H$	-0.271	-0.265	0.260	1					
$T$	0.202	0.322	0.859	0.050	1				
$\gamma_o$	-0.347	0.345	0.605	-0.039	0.105	1			
$\mu$	0.235	-0.026	-0.379	-0.030	0.115	-0.573	1		
$B_o$	0.121	0.090	0.723	-0.089	0.571	0.699	-0.648	1	
$R_s$	0.022	-0.421	0.738	0.167	0.596	0.807	-0.634	0.984	1

## 2 指标参数的技术界限

(1) 孔隙度。孔隙分布狭窄的岩层更有利于注气开发<sup>[5]</sup>。在某些情况下,水驱效果比较差的油层,由于固有的微观地质条件较好,注气开发的效果往往很好。图1为目前成功实例的孔隙度分布区间,加权平均孔隙度为13.8%,95%置信区间为[12.4%,15.1%]。

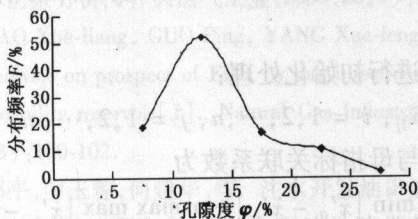


图1 孔隙度分布

Fig. 1 Distribution of porosity

(2) 润湿性。理论研究和岩心试验均表明,在水湿介质中由于水的存在会使水锁现象更加严重,不利于气驱油藏的开发<sup>[6-7]</sup>。所以当岩石润湿性为弱亲油到中等亲油时,气驱效果最佳。

(3) 非均质性。油层非均质性主要影响注入气波及系数和垂向驱油效率。纵向非均质性可抑制混相溶剂因重力超覆带来的危害,有助于水平驱替,但对于垂向驱替,非均质性将阻碍溶剂向下运动,并且由于低渗透屏障的截流作用,会造成溶剂大量损失。总的来说,非均质性对气驱开发是不利的,一般要求

变异系数  $V_k < 0.6$ <sup>[8]</sup>。

(4) 油藏倾角。在油藏顶部或在构造下倾部位注氮气,利用重力分异作用能有效地降低残留在顶部的剩余油。油藏倾角越大,这种方式提高采收率效果越好。

(5) 油藏深度。由于注氮气混相驱替压力较高,注气油藏须有一定的埋藏深度,以避免驱替压力超过地层破裂压力,破坏储层及盖层完整性。研究区油藏深度呈正态分布(图2),加权平均油藏深度为2.805 km,95%置信区间为[2.407 km,3.204 km]。

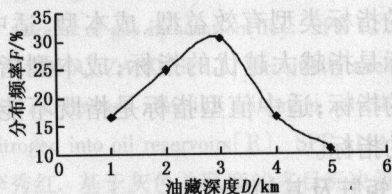


图2 油藏深度分布

Fig. 2 Distribution of reservoir depth

(6) 储层厚度。储层厚度的增大会导致烃相之间发生重力对流分离和重力舌进,且储层厚度越大,层间矛盾就越突出。因此,储层厚度越小越好,一般要求小于10 m。

(7) 原油黏度。不利的流度比会产生黏性指进,降低注入气驱油效率,因此注气开发要求油藏原油黏度越低越好,一般  $\mu < 0.5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。

(8)当前含油饱和度。含油饱和度是预测经济可行性的关键因素,主要取决于流入流体的成本、油价、油藏流体特性及油藏特性。原油饱和度越大越好,一般  $S_o > 40\%$ 。

(9)溶解气油比。室内试验表明<sup>[9-10]</sup>,含溶解气的原油注氮气驱油效果比不含溶解气原油的驱油效果好,但是过多的溶解气会加速气体运移,引起溶剂的过早突破,而且容易就地稀释溶剂,对相态产生危害作用,降低气驱效果。图3为成功实例的溶解气油比的分布区间,加权平均数为190,95%置信区间为[139.6,240.4]。

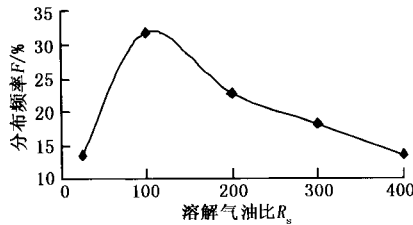


图3 溶解油气比分布

Fig.3 Distribution of solution gas-oil ratio

根据以上参数的技术界限,就可以进行氮气驱目标油藏的初步筛选,但是实际油藏并不能完全满足以上条件,需要对其作注气适宜度的综合评价。

### 3 多属性评价模型的建立

设待评价的油藏有  $n$  个,记为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,特征参数指标有  $m$  个,记为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ ,  $x_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ) 表示油藏  $x_i$  关于第  $j$  个指标值,则  $n$  个油藏  $m$  个指标值构成的矩阵  $Z = (x_{ij})_{n \times m}$  为方案集对指标集的评价矩阵。

常见的指标类型有效益型、成本型、适中值型。效益型指标是指越大越优的指标;成本型指标是指越小越优的指标;适中值型指标是指既不能太大也不能太小的指标。

#### 3.1 评价矩阵及其初始化

记相对理想目标油藏  $x_0$  对指标  $v_j$  的属性值为  $x_{0j}$ ,则

$$x_{0j} = \begin{cases} \max(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}), & j \in I_1; \\ \min(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}), & j \in I_2; \\ x_{0j} = x_{ej}, |x_{ej} - \bar{x}| = \min(|x_{1j} - \bar{x}|, |x_{2j} - \bar{x}|, \dots, |x_{nj} - \bar{x}|), & j \in I_3. \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $I_1, I_2, I_3$  分别表示效益型、成本型和适中值型指标的下标集合;  $\bar{x}_j$  为指标  $v_j$  的理论最优值;矩阵  $A = (x_{ij})_{(n+1) \times m}$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ) 为目

标油藏集  $X$  对指标集  $V$  的评价矩阵。

为消除量纲,使各指标之间具有可比性,须对初值进行无量纲化<sup>[11]</sup>。

令

$$x'_{ij} = \begin{cases} x_{ij}/x_{0j}, & j \in I_1; \\ x_{0j}/x_{ij}, & j \in I_2; \\ \min(x_{ij}, x_{0j})/\max(x_{ij}, x_{0j}), & j \in I_3, \end{cases} \quad (2)$$

则矩阵  $A' = (x'_{ij})_{(n+1) \times m}$  为矩阵  $A$  的初始化矩阵。

将理想油藏  $x'_0$  视为母序列,待评价油藏  $x'_i$  视为子序列,  $x'_0$  与  $x'_i$  在第  $j$  点的关联系数  $r_{ij}$  为

$$r_{ij} = \frac{\min_{1 \leq i \leq n} \min_{1 \leq j \leq m} |x'_{ij} - x'_{0j}| + \rho \max_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} |x'_{ij} - x'_{0j}|}{|x'_{ij} - x'_{0j}| + \rho \max_{1 \leq i \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} |x'_{ij} - x'_{0j}|} \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为分辨率系数,其意义是削弱最大绝对差值太大引起的失真,提高关联系数之间的差异显著度,  $\rho \in (0, 1)$ ,通常取  $\rho = 0.5$ <sup>[12]</sup>。

#### 3.2 指标权重的确定

确定权重主要有主观赋权法和客观赋权法<sup>[13-14]</sup>。本文中采用一种新的主客观结合的赋权法,能快速、客观地确定指标权重。

选取对评价结果影响最大的因素作为母指标,假设第  $c$  个因素影响最大,记为  $\bar{X}_c = (x_{1c} \ x_{2c} \ \dots \ x_{nc})^T$ ,选取原油黏度为母指标,其他因素作为子指标,记为  $\bar{X}_j = (x_{1j} \ x_{2j} \ \dots \ x_{nj})^T$  ( $j = 1, 2, \dots, m, j \neq c$ ),将各指标对评价结果的影响程度反映为子指标与母指标的关联度,并以此作为指标权重。

首先进行初始化处理:

$$\bar{x}'_{ij} = \bar{x}_{ij}/x_{1j}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

则子指标与母指标关联系数为

$$y_{ij} = \frac{\min_{1 \leq j \leq m} \min_{1 \leq i \leq n} |x'_{ij} - \bar{x}'_{ic}| + \rho \max_{1 \leq j \leq m} \max_{1 \leq i \leq n} |x'_{ij} - \bar{x}'_{ic}|}{|x'_{ij} - \bar{x}'_{ic}| + \rho \max_{1 \leq j \leq m} \max_{1 \leq i \leq n} |x'_{ij} - \bar{x}'_{ic}|} \quad (5)$$

对矩阵  $Y = (y_{ij})_{n \times m}$  按列求平均,并进行归一化处理:

$$y_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (6)$$

$$\omega_j = y_j / \sum_{j=1}^m y_j, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

则矩阵  $W = (\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_m)^T$  为各指标的权重。综合加权评价值  $f_i = r_{ij}\omega_j$ ,  $f_i$  可以作为对各油藏注氮气整体潜力的评价值,其值越大,说明与理想油藏越接近,注气效果越好。

## 4 实例分析

选择另外4个注氮气驱砂岩油藏对本方法进行实例验证,具体油藏参数见表2。

根据以上理论及公式,可计算得出各目标油藏的灰色加权评价值  $F = (f_i)_n$ 。

$$F = (0.7727, 0.6091, 0.8097, 0.5257).$$

表2 油藏参数

Table 2 Reservoirs parameters

油藏	储层厚度 $H/m$	地层原油黏度 $\mu/(mPa \cdot s)$	非均质性 $V_k$	孔隙度 $\varphi/\%$	油藏深度 $D/km$	溶解气油比 $R_s$	地层倾角 $\theta/(^\circ)$	含油饱和度 $S_o/\%$	润湿指数 $I_{wet}$
W12	10.4	0.126	0.48	19	4.155	474	5	58	0.45
East Binger	19.1	0.360	0.62	7	2.743	178	1	45	0.40
W8	7.6	0.126	0.42	20	4.015	431	5	47	0.45
Jay	29.0	0.180	0.68	14	4.785	321	2	35	0.20

## 5 结论

(1)所建模型能够合理、有效、客观地反映地层真实情况,降低油藏开发方式选择的盲目性,提高油藏评价的准确性,可用于指导低渗透油藏氮气驱的合理开发及风险评估。

(2)综合考虑了主客观两方面的影响和各油藏指标参数之间的相互联系,使权重和评价模型更具有科学性及其可靠性。

### 参考文献:

- [1] 曹学良,郭平,杨学峰,等. 低渗透油藏注气提高采收率前景分析[J]. 天然气工业,2006,26(3):100-102.  
CAO Xue-liang, GUO Ping, YANG Xue-feng, et al. An analysis on prospect of EOR by gas injection in low permeability reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(3):100-102.
- [2] 郭平,罗玉琼,何建华,等. 注水开发油田进行注气开发的可行性研究[J]. 西南石油学院学报,2003,25(4):37-40.  
GUO Ping, LUO Yu-qiong, HE Jian-hua, et al. A feasibility of gas injection for oil reservoirs after water flooding [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2003, 25(4):37-40.
- [3] DANIEL Diaz. Screening criteria for application of carbon dioxide miscible displacement in water flooded reservoirs containing light oil[R]. SPE 35431, 1996.
- [4] BRENT Thomas. Proposed screening criteria for gas injection evaluation[J]. JCPT, 1998, 11(37):14-20.
- [5] 熊钰,孙良田,孙雷,等. 基于模糊层次分析法的注CO<sub>2</sub>混相驱油藏综合评价方法[J]. 石油学报,2002,23(6):60-62.

由此可见,这4个目标油藏注氮气开发的潜力从大到小依次为W8,W12,East Binger,Jay,氮气驱油藏W8,W12,East Binger,Jay实际提高的采收率分别为21%,18%,15%,10%。预测结果与实际结果完全吻合,说明所建立的模型是准确可靠的,可用于指导低渗透油藏氮气驱的合理开发及风险评估。

- XIONG Yu, SUN Liang-tian, SUN Lei, et al. A new integrative evaluation way for candidate of carbon dioxide miscible flooding reservoirs based on fuzzy analytical hierarchy process[J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6):60-62.
- [6] WYLIE Philip L, MOHANTY Kishore K. The effect of wettability on oil recovery by near-miscible gas injection [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 1999, 2(6):558-564.
- [7] LAROCHE C, VIZIKA O, KALAYDJIAN F. Network modeling as a tool to predict three-phase injection in heterogeneous wettability porous media[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999, 24(2):155-168.
- [8] 邓瑞健,吴应川,陈德斌. 低渗透油藏注气采油技术[M]. 北京:石油工业出版社,2003:9-15.
- [9] ALCOCKER C F, MENZIE D E. Enhanced oil recovery by nitrogen injection; the effect of increased temperature and the amount of gas in solution[R]. SPE 12709,1984.
- [10] VAHIDI A, ZARGAR Gh. Sensitivity analysis of important parameters affecting minimum miscibility pressure of nitrogen into oil reservoirs[R]. SPE 111411, 2007.
- [11] 李秀红. 基于灰色关联度的多目标决策模型及应用[J]. 山东大学学报:自然科学版,2007,42(12):33-36.  
LI Xiu-hong. A model based on the grey relation grade for multi-objective decision-making and its application [J]. Journal of Shandong University, China (Edition of Natural Science), 2007, 42(12):33-36.
- [12] 陈义华,卢顺霞,吴志彬,等. 区域影响力的多层次灰色评价模型及其应用[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(12):141-145.  
CHEN Yi-hua, LU Shun-xia, WU Zhi-bin, et al. Application of AHP GRAP model in the region influence judgement[J]. Journal of Chongqing University, China

(Edition of Natural Science), 2007, 30(12):141-145.

[13] 郭红玲,黄定轩. 多属性决策中属性权重的无偏好赋权方法[J]. 西南交通大学学报, 2007, 42(4): 505-510.

GUO Hong-ling, HUANG Ding-xuan. Weight integration method without preference on multi-attribute decision-making[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2007, 42(4):505-510.

[14] 姚升保,岳超源. 基于综合赋权的风险型多属性决策

方法[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(12):2047-2051.

YAO Sheng-bao, YUE Chao-yuan. Method for multiple attribute decision-making under risk based on synthetic weighting [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(12): 2047-2051.

(编辑 李志芬)