

## 模糊综合评判法在多层气层测试井 产能劈分中的应用

岳崇旺<sup>1</sup>, 杨小明<sup>2</sup>, 钟晓勤<sup>2</sup>, 潘保芝<sup>3</sup>, 王 飞<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院,  
陕西 西安 710018; 3. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

**摘 要:** 多层测试井的产能劈分是油气藏勘探开发中的一个关键问题。影响产能的储层参数很多, 不同的物性参数对储层产能影响的大小不同; 模糊系统理论将综合评价的定性问题转化为定量问题, 层次分析法将不同因素按照相关性大小计算其权值。利用综合评价系数对多层试气中的小层进行综合评判和优选, 进而对产能进行合理劈分。给出了评价因素对等级区间隶属度的求取方法以及不同因素之间相对权值的计算方法。通过实例给出了模糊综合评判法进行产能劈分的原理和具体步骤, 进一步验证了该方法在鄂尔多斯盆地苏里格气田的应用效果。

**关键词:** 产能劈分; 模糊综合评判法; 层次分析法; 测井学; 储层参数; 隶属度; 苏里格气田

中图分类号: P631

文献标志码: A

## Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation Method in the Production Dividing of Multi-layered Gas Reservoirs of Testing Wells

YUE Chong-wang<sup>1</sup>, YANG Xiao-ming<sup>2</sup>, ZHONG Xiao-qin<sup>2</sup>, PAN Bao-zhi<sup>3</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina,

Xi'an 710018, Shaanxi, China; 3. School of Geos exploration Science and Technology,

Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China)

**Abstract:** Production dividing is a key issue in exploration and development of multi-layered oil and gas reservoirs of testing wells. There are many factors affecting the productivity of reservoir productivity, and the influences of physical parameters are different. The qualitative problem of comprehensive evaluation was transformed into quantitative problem by fuzzy system theory, and the weights of different factors were calculated by analytic hierarchy process according to different correlations. Small layers in multi-layered gas testing well were evaluated comprehensively and selected optimally based on comprehensive evaluation coefficient, and then the productivity of multi-layered gas reservoir was reasonably divided. The method of calculating membership of evaluation factors to grade intervals was given, and the calculation method of relative weight between different factors was put forward. Furthermore, principle and concrete steps of fuzzy comprehensive evaluation method for production dividing were proposed with the example. It is verified that the application of the method in Sulige oilfield of Ordos Basin is good.

**Key words:** production dividing; fuzzy comprehensive evaluation method; analytic hierarchy

收稿日期: 2014-09-02

基金项目: 国家科技重大专项项目(2011ZX05044)

作者简介: 岳崇旺(1981-), 男, 河南通许人, 讲师, 理学博士, E-mail: ycw1981@163.com。

process; well logging; reservoir parameter; membership; Sulige gasfield

## 0 引言

在油气藏勘探开发过程中,多层测试条件下获取的是多层合采的产能,在实际生产过程中为了合理布置施工,还要了解各小层的产能情况,但由于层与层之间物性参数差异大,非均质性强,影响产能的因素多<sup>[1-8]</sup>,所以很难弄清每个小层对产能的贡献,并对后续的增产措施带来了盲目性。因此,如何对多层测试井产能进行合理的劈分对后续施工开发是一个关键性的问题<sup>[9-11]</sup>。对于多层测试井的产能劈分,前人常依靠经验来指导现场施工<sup>[12]</sup>,存在一定的主观盲目性。目前,劈分气井产能常用的方法基于油藏工程原理,但需要大量的测试资料,且气层产能受多种因素影响,因此,其应用效果并不是很理想。对于天然气储层的产能来说,可将每个小层看作一个系统,影响该系统的产能有多种因素,每个因素既相互联系又各自独立,因此,可以将各种因素综合起来,利用测井资料参数对产能进行劈分。本文首先利用模糊系统理论将多因素综合评价的定性问题转化为定量问题<sup>[13-18]</sup>,再利用层次分析法<sup>[19-24]</sup>进一步确定影响小层产能的各因素权重,利用权值对多层试气中的小层进行综合评判和优选,进而对产能进行合理劈分。

## 1 模糊分析

模糊分析法是一种基于模糊数学的综合评价方法。它将多因素制约的定性问题转化为定量问题,在很多领域得到了广泛应用。地层产能影响因素很多,评价不同的地层产能既要考虑相同影响因素之间的大小关系,又要考虑不同因素之间的影响比重,模糊分析法能够将各种指标按相同影响因素的大小关系进行量化。通常情况下,首先要确定制约对象的主要因素有哪些;其次,给出各个因素的划分等级;根据给定的划分等级,进一步计算评价向量,利用评价向量可以按指标求取每个评价对象的评价矩阵。它具有结果清晰、系统性强的特点。

### 1.1 确定影响因素论域

影响储层产能的因素有很多。从储层的参数来看,其主要包括孔隙度、渗透率、饱和度、密度、声波时差、电阻率、油压等。在对储层产能综合评价之前,需确定影响储层产能的因素。设影响因素表示为 $u$ ,最大值和最小值分别为 $u_{\max}$ 、 $u_{\min}$ ,假设有 $p$ 个评价指标,则影响因素域为

$$u = \{u_1, u_2, \dots, u_p\} \quad (1)$$

式中: $u_i$ 为第 $i$ 个影响因素, $i=1,2,\dots,p$ 。

然后,对影响因素指标进行归一化。设 $x$ 为归一化后的影响因素值,则对于越大越好型,其表达式为

$$x = \frac{u - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} \quad (2)$$

对于越小越好型,其表达式为

$$x = 1 - \left| \frac{u - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}} \right| \quad (3)$$

### 1.2 对评价指标进行等级划分

等级划分可根据需要确定级别的个数。本次研究的评价等级根据优、良、中、差4个等级分为4个级别。设 $s_j$ 、 $t_j$ 为区间截止值,则评价等级区间为 $[s_j, t_j]$ ,若评价区间以优、良、中、差4个评价区间划分,评价级别见表1。其中, $j$ 为正整数。

表1 评价级别

Tab. 1 Evaluation Grade

级别	差	中	良	优
等级区间	$[0, 0.25)$	$[0.25, 0.5)$	$[0.5, 0.75)$	$[0.75, 1.0]$

### 1.3 计算评价级别向量和评价矩阵

根据评价等级区间 $[s_j, t_j]$ ,可进一步计算评价向量。设评价向量为 $\mathbf{V}$ ,评价区间的中心值为 $v_j$ ,则

$$\mathbf{V} = [v_1, v_2, \dots, v_k] \quad (4)$$

$$v_j = s_j + \frac{t_j - s_j}{2} \quad (5)$$

式中: $k$ 为正整数。

利用评价向量可以求出每个评价指标对各个评价等级区间的隶属度。对于某个待评价地层,设有 $n$ 个评价指标,评价等级个数 $m$ 为4,则每个评价指标对每个评价等级区间都可以计算出其隶属度,由隶属度组成了地层的评价矩阵 $\mathbf{R}$ ,其表达式为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $r_{ij}$ 为该地层单个评价指标对评价等级空间的隶属度, $r_{ij} = 1 - |x_i - v_j|$ , $i$ 为正整数。

## 2 层次分析法确定各因素权重

模糊理论计算出并由隶属度组成的评价矩阵反映了不同地层相同评价因素对评价等级区间的隶属大小关系。然而,不同因素对产能的影响是不一样的。为了求取各因素对产能影响的比重,采用层次

分析法确定各因素对产能的影响权值,将权值和隶属度结合起来求取获得地层产能的评价系数。

层次分析法是美国运筹学家 Saaty 于 20 世纪 70 年代初,应用网络系统理论和多目标综合评价方法,提出的一种层次权重决策分析方法。其基本原理是根据性质和达到的目标将系统分为不同的组成因素,针对各因素与因素之间的关联和归属关系按照不同层次进行组合,从而使问题归结为最底层对目标层的综合评判。

## 2.1 构造层次结构模型

影响储层产能的因素包括地层的孔隙度、渗透率、饱和度、地层压力,此外,还包括一些电性参数如电阻率、声波时差、密度等。储层的产能是这些因素综合作用的结果。这些参数在不同地质条件下对产能影响的大小是不一样的。运用层次分析法可以确定这些影响因素的权重。首先要建立层次结构,构造层次结构模型,本次层次模型可分为目标层和准则层(图 1)。其中: $O$  为储层产能; $u_i$  为第  $i$  个影响因素,共有  $n$  个影响因素。

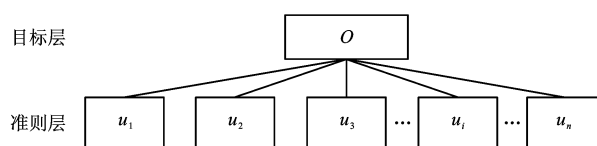


图 1 层次结构模型

Fig. 1 Hierarchical Structure Model

## 2.2 构造判断矩阵

判断矩阵元素的值反映了对各元素相对重要性的认识,常用 1~9 比率标度法将对某事物的定性认识进行量化。设判断矩阵  $P$  为  $\{p_{ij}\}$ ,标度  $p_{ij}$  是一个用定量表示定性的量度取值,该参数表示第  $i$  个评价指标相对第  $j$  个评价指标对地层产能影响的相对大小取值。判断矩阵的元素取值见表 2。

## 2.3 计算判断矩阵

计算出判断矩阵  $\{p_{ij}\}$  的最大特征根  $\lambda_{\max}$ ,并求出对应的特征向量,将特征向量归一化记为  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ,则特征向量  $w$  中元素(即影响因素)  $u_1, u_2, \dots, u_n$  就是目标层相对重要性的排序权值。

## 2.4 一致性检验

为了对判断矩阵  $\{p_{ij}\}$  进行一致性检验,需计算一致性指标  $I_{CI}$ ,  $I_{CI} = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ 。一致性指标越接近于 0,  $\{p_{ij}\}$  的一致性越好;一致性指标越大,  $\{p_{ij}\}$  的一致性越差;当一致性指标为 0 时,  $\{p_{ij}\}$  有完全的一致性。

表 2 层次分析标度取值及对应含义

Tab. 2 Values of Hierarchical Structure Proportion Quotient and Their Signification

$p_{ij}$	含义
1	第 $i$ 个因素和第 $j$ 个因素同样重要
3	第 $i$ 个因素比第 $j$ 个因素稍微重要
5	第 $i$ 个因素比第 $j$ 个因素明显重要
7	第 $i$ 个因素比第 $j$ 个因素显著重要
9	第 $i$ 个因素比第 $j$ 个因素极其重要
1/3	第 $j$ 个因素比第 $i$ 个因素稍微重要
1/5	第 $j$ 个因素比第 $i$ 个因素明显重要
1/7	第 $j$ 个因素比第 $i$ 个因素显著重要
1/9	第 $j$ 个因素比第 $i$ 个因素极其重要

注:标度  $p_{ij}$  取值 2 表示第  $i$  个因素和第  $j$  个因素的相对重要性介于取值 1 和 3 之间,标度  $p_{ij}$  取值 4、6、8 的含义依此类推;标度  $p_{ij}$  取值 1/2 表示第  $i$  个因素和第  $j$  个因素的相对重要性介于取值 1 和 1/3 之间,标度  $p_{ij}$  取值 1/4、1/6、1/8 的含义依此类推。

## 3 综合评价与产能劈分

模糊分析计算出的评价矩阵  $R$  表征了地层相同影响因素之间的相对大小,层次分析法计算出的权值  $w$  表征了不同指标影响的相对贡献比例。将评价矩阵按权值进行加权综合便可以获得地层综合评价系数。

设综合评价向量为  $M$ ,则

$$M = wR = (w_1, w_2, \dots, w_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} = (M_1, M_2, \dots, M_m)^T \quad (7)$$

式中:元素  $M_j$  为不同评价指标对第  $j$  个评价区间的隶属度,该隶属度可以看作某地层的各种影响因素按层次分析法计算出的权值进行加权求和得出的综合隶属度。

综合隶属度计算公式为

$$M_j = \sum_{i=1}^n r_{ij} w_i \quad (8)$$

将各个评价区间计算出的综合隶属度  $M_j$  与评价向量  $V$  加权求和计算可得综合评价系数  $D$  为

$$D = \sum_{j=1}^m M_j v_j \quad (9)$$

综合评价系数是根据相同影响因素  $u_1, u_2, \dots, u_n$  的相对大小及不同影响因素重要性权值对地层做出的定量综合评价。根据综合评价系数和各小层的厚度  $h_i$  便可以对产能进行劈分。设多层试气总产能为  $E$ ,则各小层产能  $E_i$  为

$$E_i = ED_i h_i / (\sum_{i=1}^N D_i h_i) \quad (10)$$

式中:  $N$  为小层数;  $D_i$  为第  $i$  小层综合评价系数。

4 实例分析

本文以鄂尔多斯盆地苏里格气田 A 井为例进

行分析,该井进行了多层测试。各小层的储层参数见表 3,层次结构模型目标层为储层的产能,影响因素有 7 个,分别是电阻率、孔隙度、渗透率、含气饱和度、密度、声波时差、油压。对于影响气层产能的指标来说,电阻率、孔隙度、渗透率、含气饱和度、声波时差属于越大越好型,密度属于越小越好型。

表 3 苏里格气田某多层测试井各小层的指标

Tab. 3 Indicators of Each Small Layer of a Multi-layered Testing Well in Sulige Oilfield

地层	厚度/m	电阻率/( $\Omega \cdot m$ )	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	含气饱和度/%	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	声波时差/( $\mu s \cdot m^{-1}$ )	油压/MPa
F <sub>1</sub>	4.1	76.31	8.54	0.52	50.94	2.51	223.70	4.00
F <sub>2</sub>	4.1	68.43	3.62	0.10	33.01	2.63	214.50	2.60
F <sub>3</sub>	3.9	90.93	12.92	0.25	66.10	2.31	224.20	1.20
F <sub>4</sub>	6.6	41.10	11.30	19.50	52.99	2.42	237.00	7.70

4.1 评价指标归一化

针对不同类型影响因素指标,根据式(2)、(3)对数据进行归一化计算,计算结果见表 4。

表 4 地层参数指标归一化计算结果

Tab. 4 Normalized Results of Formation

Parameter Indicators

地层	电阻率	孔隙度	渗透率	含气饱和度	密度	时差	油压
F <sub>1</sub>	0.706 60	0.529 0	0.021 7	0.541 80	0.343 7	0.409 33	0.430 8
F <sub>2</sub>	0.548 46	0.000 0	0.000 0	0.000 00	0.000 0	0.000 00	0.215 0
F <sub>3</sub>	1.000 00	1.000 0	0.007 7	1.000 00	1.000 0	0.432 40	0.000 0
F <sub>4</sub>	0.000 00	0.825 8	1.000 0	0.603 80	0.625 0	1.000 00	1.000 0

4.2 计算评价矩阵

按照表 1 以优、良、中、差 4 个级别划分为 4 个评价区间,分别为  $[0, 0.25)$ 、 $[0.25, 0.5)$ 、 $[0.5, 0.75)$ 、 $[0.7, 1.0]$ ,则根据式(5)可分别求出  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_3$ 、 $v_4$  分别为 0.125、0.375、0.625、0.875,则评价向量  $V$  为

$$V = (0.125, 0.375, 0.625, 0.875) \quad (11)$$

按照式(6)分别计算出  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  地层的评价矩阵。 $F_1$  地层的评价矩阵  $R_1$  为

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.418\ 398 & 0.668\ 398 & 0.918\ 398 & 0.831\ 602 \\ 0.595\ 968 & 0.845\ 968 & 0.904\ 032 & 0.654\ 032 \\ 0.583\ 144 & 0.833\ 144 & 0.916\ 856 & 0.666\ 856 \\ 0.715\ 666 & 0.965\ 666 & 0.784\ 334 & 0.534\ 334 \\ 0.896\ 649 & 0.646\ 649 & 0.396\ 649 & 0.146\ 649 \\ 0.694\ 231 & 0.944\ 231 & 0.805\ 769 & 0.555\ 769 \\ 0.770\ 161 & 0.979\ 839 & 0.729\ 839 & 0.479\ 839 \end{bmatrix} \quad (12)$$

4.3 利用层次分析法确定指标权重

得到评价矩阵之后,接着要求取不同因素对产能的影响权值。根据表 2 的层次分析标度取值进行对比打分,构造判断矩阵。不同参数在层次分析标

度取值中打分的分值是一个主观定性大小,在打分时要根据参数与产能的相关性强弱来权衡。图 2(a)~(f)分别为渗透率、孔隙度、声波时差、含气饱和度、密度、电阻率与产能之间的相关性,其相关系数分别为 0.76、0.50、0.42、0.39、0.26、0.15。根据表 2 的层次分析标度取值及其含义选取标度值。电阻率与产能的相关系数为 0.15,标度定为 1;密度与产能的相关系数为 0.26,密度相对电阻率对产能的贡献稍微重要,将其标度定为 2。根据“相关系数越大,该影响因素标度越高”的原则,依照表 2 和图 2 分别对电阻率、密度、含气饱和度、声波时差、孔隙度、渗透率、油压 7 个影响指标依次进行两两比较,得出  $p_{ij}$  的取值,见表 5。构造判断矩阵  $P$  为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 1/3 & 1/5 & 1/7 & 1/7 \\ 2 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1/5 & 1/5 \\ 3 & 2 & 1 & 1/2 & 1/2 & 1/3 & 1/3 \\ 3 & 2 & 2 & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/3 \\ 5 & 3 & 2 & 2 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 7 & 5 & 3 & 3 & 2 & 1 & 1 \\ 7 & 5 & 3 & 3 & 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

表 5 地层参数层次分析标度取值

Tab. 5 Values of Hierarchical Structure Proportion

Quotiety of Formation Parameters

参数	电阻率	密度	含气饱和度	声波时差	孔隙度	渗透率	油压
电阻率	1	1/2	1/3	1/3	1/5	1/7	1/7
密度	2	1	1/2	1/2	1/3	1/5	1/5
含气饱和度	3	2	1	1/2	1/2	1/3	1/3
声波时差	3	2	2	1	1/2	1/3	1/3
孔隙度	5	3	2	2	1	1/2	1/2
渗透率	7	5	3	3	2	1	1
油压	7	5	3	3	2	1	1

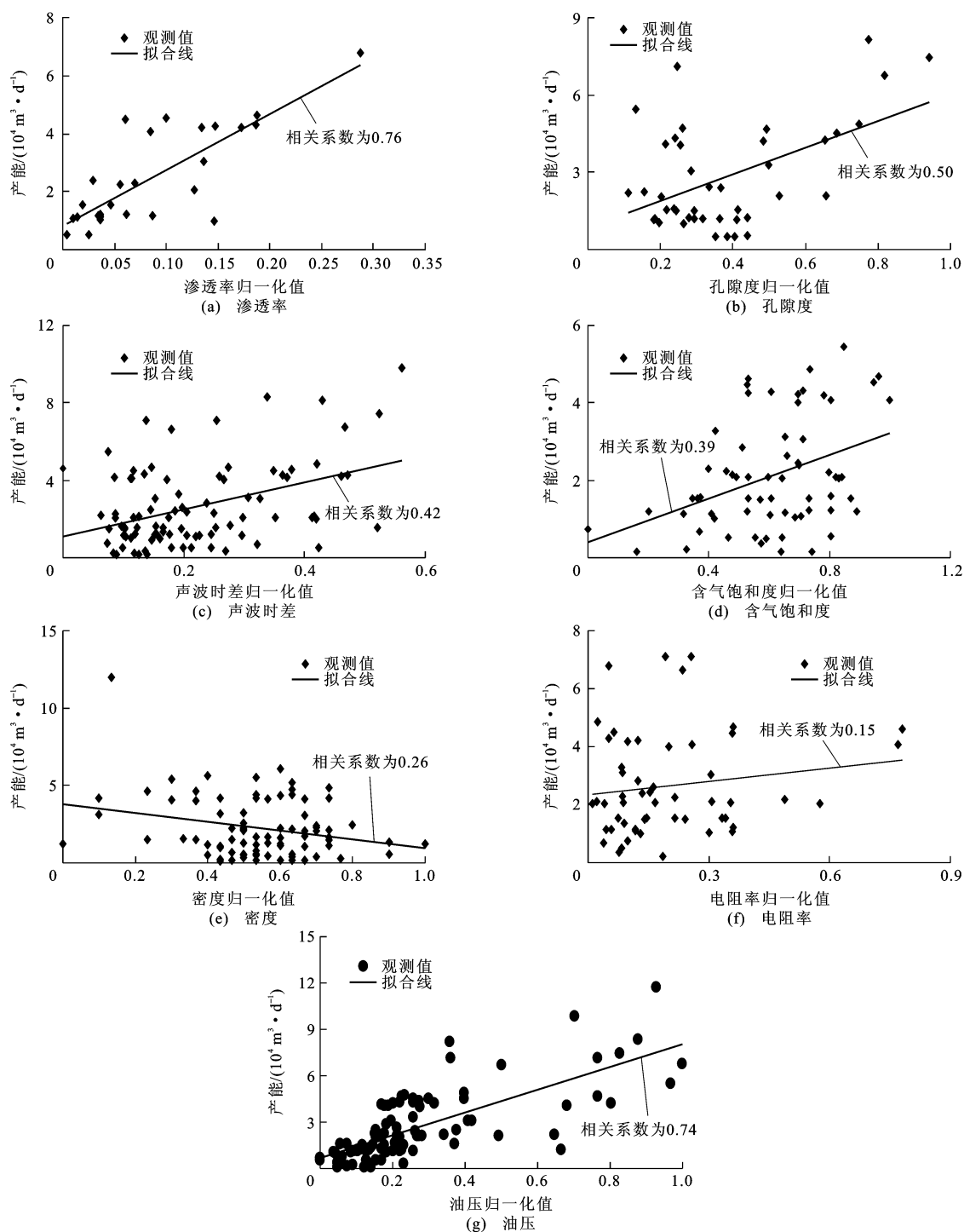


图2 地层参数指标与产能之间的关系

Fig. 2 Relationships Between Formation Parameter Indicator and Gas Productivity

计算判断矩阵  $P$  的最大特征根,并求出对应的特征向量,在满足一致性的条件下得到 7 个影响因素的权重  $w$  为

$$w = (0.034\ 768\ 6, 0.079\ 885\ 6, 0.088\ 968\ 5, 0.088\ 968\ 6, 0.171\ 441, 0.267\ 984, 0.267\ 984)$$

#### 4.4 综合评价

将权重和每个地层的评价矩阵带入式(7),可分

别求出每个地层的综合评价向量  $M$ 。将每个地层的综合评价向量  $M$  和评价向量  $V$  代入式(9),可计算出每个地层的综合评价系数(表 6)。

#### 4.5 产能劈分

根据多层产能试气结果,4 个小层多层试气总产能为  $51\ 326\ \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,各小层厚度  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 、 $h_4$  分别为 4.1、4.1、3.9、6.6 m。设各层的产能分别为



表 6 小层综合评价系数

Tab. 6 Comprehensive Evaluation Coefficients of Small Layer

地层	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>
综合评价系数	0.466 788	0.354 229	0.476 012	0.564 536

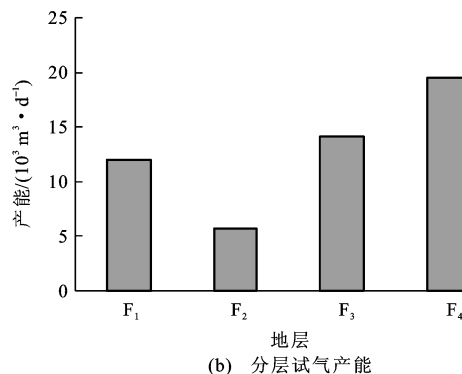
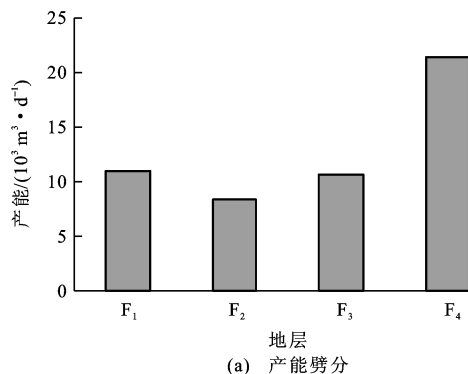


图 3 劈分产能与分层试气产能的对比

Fig. 3 Comparison of Divided Production with Result of Gas Testing

## 5 结 语

模糊综合评判法是将模糊数学原理与层次分析法结合起来,对储层进行综合评判,并根据综合评价指数进行产能劈分的一种有效方法。在劈分过程中充分利用储层的物性参数,将定性问题转化为定量问题,通过计算每个小层的评价因子,按照层厚进行加权,对多层试气的产能进行劈分。通过在鄂尔多斯盆地苏里格气田某井的应用可以看出,该方法对于多层测试气井的产能劈分是行之有效的。

## 参考文献:

## References:

- [1] LIU C L, ZHANG S H, DOU S P, et al. Productivity Analysis of Fractured Wells in Low-permeability Naturally Fractured Reservoirs[C]// IEEE. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference 2010. Chengdu: IEEE, 2010: 20-25.
- [2] AGUILERA R. Well Test Analysis of Multi-layered Naturally Fractured Reservoirs[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2000, 39(7): 21-37.
- [3] NOUSHABADI M R J, JOURDE H, MASSONNAT G. Evaluation of the Inter-porosity Exchange Coefficient Inferred from Well Test in a Fractured Reservoir with a Non-uniform Distribution Pattern: A Numerical Study[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2013, 108: 82-95.
- [4] 高建华, 李 瑞, 王改芳, 等. 用测井参数预测多层合试产能的方法[J]. 成都理工大学学报, 2002, 29(3):

$E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ 、 $E_4$ , 则根据式(10)对多层试气产能进行劈分, 劈分结果见图 3。从图 3 可以看出:  $F_1$ 、 $F_3$ 、 $F_4$  地层产能较高, 为含气层;  $F_2$  地层产量较低, 为差气层。劈分产能与分层试气产能结果有较好的一致性。

296-299.

GAO Jian-hua, LI Rui, WANG Gai-fang, et al. The Method of Production Capacity Prediction of Multilayer Testing by Parameters of Logging[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002, 29(3): 296-299.

- [5] ZHANG L J, LI D L, LI L, et al. Development of a New Compositional Model with Multi-component Sorption Isotherm and Slip Flow in Tight Gas Reservoirs[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 1061-1072.
- [6] 卢文东, 李 伟, 路云峰. 榆林—神木气田上古生界具不同产能的砂岩气层特征分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 54-56.
- LU Wen-dong, LI Wei, LU Yun-feng. Analyzing the Characteristics of Upper Paleozoic Sandstone Reservoirs with Different Productivities in Yulin-Shenmu Gasfield[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(7): 54-56.
- [7] 何 军, 胡永乐, 何东博, 等. 低渗致密气藏产能预测方法[J]. 断块油气田, 2013, 20(3): 334-336.
- HE Jun, HU Yong-le, HE Dong-bo, et al. Productivity Prediction Methods for Tight Gas Reservoir with Low Permeability[J]. Fault-block Oil and Gas Field, 2013, 20(3): 334-336.
- [8] 黄 力, 何顺利, 张小霞, 等. 超低渗透储层产能主要影响因素确定方法研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(30): 7408-7413.
- HUANG Li, HE Shun-li, ZHANG Xiao-xia, et al. Research on Determination of the Main Factors Influencing the Oil Well Productivity of Ultra Low Permeability Reservoir[J]. Science Technology and Engineer-

- ing, 2010, 10(30): 7408-7413.
- [9] 别爱芳, 冀光, 张向阳, 等. 产量构成法中措施产量劈分及预测的两种方法[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(5): 628-632.
- BIE Ai-fang, JI Guang, ZHANG Xiang-yang, et al. Two Ways for Breaking out and Forecasting Stimulation Production by Production Composition Method[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(5): 628-632.
- [10] 罗刚, 蒋志斌, 徐后伟, 等. 基于数据挖掘的单层产量劈分方法[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(10): 148-169.
- LUO Gang, JIANG Zhi-bin, XU Hou-wei, et al. Single Layer Production Splitting Method Based on Data Mining[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(10): 148-169.
- [11] 李坤, 喻高明, 王乔. 一种新的产量劈分方法[J]. 油气地球物理, 2011, 9(4): 19-22, 25.
- LI Kun, YU Gao-ming, WANG Qiao. A New Production Split Method[J]. Petroleum Geophysics, 2011, 9(4): 19-22, 25.
- [12] 杨波, 唐海, 周科, 等. 多层合采气井合理配产简易新方法[J]. 油气井测试, 2010, 19(1): 66-68.
- YANG Bo, TANG Hai, ZHOU Ke, et al. A Simple New Method of Proper Proration for Multi-layered Commingled Gas Wells[J]. Well Testing, 2010, 19(1): 66-68.
- [13] 李鸿吉. 模糊数学基础及实用算法[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- LI Hong-ji. Fuzzy Mathematical Foundation and Practical Algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [14] 吴建发, 郭建春, 赵金洲. 压裂酸化选井模糊综合评判方法[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(2): 54-57, 84.
- WU Jian-fa, GUO Jian-chun, ZHAO Jin-zhou. Fuzzy Comprehensive Evaluation Method to Choose the Candidate Wells for Fracturing[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2004, 26(2): 54-57, 84.
- [15] 董红. 黄沙坨粗面岩储层流体模糊识别方法[J]. 测井技术, 2006, 30(5): 408-410.
- DONG Hong. The Method of Fuzzy Recognition for Liquid of Trachite Reservoir in Huangshatuo[J]. Well Logging Technology, 2006, 30(5): 408-410.
- [16] 范翔宇, 夏宏泉, 郑雷清, 等. 基于模糊理论的复杂岩相测井识别研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(2): 53-55.
- FAN Xiang-yu, XIA Hong-quan, ZHENG Lei-qing, et al. Well Logging Identification for Complex Lithofacies Based on Fuzzy Theory[J]. Drilling and Production Technology, 2007, 30(2): 53-55.
- [17] 黎梨苗, 陈志刚, 邓晓衡, 等. 基于模糊理论的主观信任综合评价模型研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1860-1862.
- LI Li-miao, CHEN Zhi-gang, DENG Xiao-heng, et al. Research of Subject Trust Comprehensive Evaluation Model Based on Fuzzy Theory[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(5): 1860-1862.
- [18] 刘春梅, 谭青. 模糊综合评判在油气勘探多学科指标评价预测中的应用: 以新疆柴窝堡凹陷为例[J]. 石油实验地质, 2014, 36(1): 106-109, 116.
- LIU Chun-mei, TAN Qing. Application of Fuzzy Comprehensive Evaluation in Oil and Gas Exploration with Multidisciplinary Assessment and Forecasting: A Case Study on Chaiwopu Sag in Xinjiang[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2014, 36(1): 106-109, 116.
- [19] SONG Z Y, ZHU H Q, JIA G W, et al. Comprehensive Evaluation on Self-ignition Risks of Coal Stockpiles Using Fuzzy AHP Approaches[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 32: 78-94.
- [20] 董凤娟, 孙卫, 胡绪军, 等. 灰色层次分析法在储层流动单元划分中的应用: 以丘陵油田三间房组储层为例[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(6): 1255-1261.
- DONG Feng-juan, SUN Wei, HU Xu-jun, et al. Application of Grey Analytic Hierarchy Process to Divide Flow Units: A Case from Sanjianfang Formation of Qiuling Oilfield[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2010, 40(6): 1255-1261.
- [21] TAN R R, AVISO K B, HUELIGAS A P, et al. Fuzzy AHP Approach to Selection Problems in Process Engineering Involving Quantitative and Qualitative Aspects[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2014, 92: 467-475.
- [22] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- DENG Xue, LI Jia-ming, ZENG Hao-jian, et al. Research on Computation Methods of AHP Weight Vector and Its Applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.
- [23] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.
- [24] 康毅力, 王海涛, 游利军, 等. 基于层次分析法的地层钻井液漏失概率判定[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(4): 180-186.
- KANG Yi-li, WANG Hai-tao, YOU Li-jun, et al. Probability Determination for Loss Circulation of Drilling Fluids Based on Analytic Hierarchy Process[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2013, 35(4): 180-186.