

# 基于改进 AHP 的储层综合评价方法<sup>①</sup>

孟雅蕾<sup>1</sup>, 王 予<sup>2</sup>, 陈金广<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>(西安工程大学 计算机科学学院, 西安 710048)

<sup>2</sup>(中国石油长庆油田公司第五采气厂, 西安 710021)

<sup>3</sup>(西安电子科技大学 电子工程学院, 西安 710071)

**摘 要:** 储层评价是油田有利区筛选及预测的重要基础和依据, 针对传统 AHP 方法主观性强、判断矩阵不一致等问题, 对 AHP 算法进行改进, 提出一种基于改进 AHP 的储层综合评价方法. 该方法采用群组 AHP 方法构建判断矩阵以降低专家的主观性偏见; 然后, 利用最小二乘原理构建拟优一致矩阵解决判断矩阵的不一致性问题; 其次, 在计算底层指标的评价向量时将其分为定性指标和定量指标, 其中定性指标采用专家评价得到评价向量, 定量指标量则采用效用函数法和灰色层次分析法相结合得到评价向量; 最后通过评价向量、各层指标权重对储层进行综合评价. 实例计算表明该方法可以获得更加科学、客观的储层评价标准, 能提高研究区的开发效果并为后续开发方案的调整提供有利依据.

**关键词:** 储层综合评价; AHP; 拟优一致矩阵; 效用函数法; 灰色层次分析法

## Comprehensive Reservoir Evaluation Method Based on Improved AHP

MENG Ya-Lei<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>2</sup>, CHEN Jin-Guang<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>(School of Computer Science, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

<sup>2</sup>(The Fifth Gas Plant, Changqing Oil Field of PetroChina, Xi'an 710021, China)

<sup>3</sup>(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Reservoir evaluation is the foundation of selecting and predicting the oil field favorable areas. In order to solve the problems of subjectivity and inconsistent of judging matrix, which are encountered in the traditional AHP method, an comprehensive reservoir evaluation method based on improved AHP method is proposed. The method constructs judgement matrix to reduce the expert's subjective bias by using group AHP method and quasi-optimun consistent matrix and to solve the inconsistent problem of judging matrix by using least square principle. Then, the bottom indicators are divided into non-quantifiable indicators which obtain the evaluation vector by using experts' evaluation method and quantifiable indicators which obtain the evaluation vector by using the utility function method and grey AHP method. Finally, the comprehensive reservoir evaluation is calculated by the evaluation vector and the indicator weight of each layer. The results show that the proposed method can obtain the reservoir evaluation standard more objective and scientific. The reservoir evaluation standard can improve the development effect of the study area and provide favorable basis for adjusting the subsequent development programs.

**Key words:** comprehensive reservoir evaluation; AHP method; quasi-optimun consistent matrix; utility function method; grey analytic hierarchy process

鄂尔多斯盆地安塞油田三叠系延长组长 6 油层属于典型的低渗透油藏, 而且非均质性强, 因此储层评价方法的选取对储层综合评价研究至关重要<sup>[1]</sup>. 对研

究区储层进行综合评价, 不仅可以探明剩余油储量及分布, 提高研究区的开发效果, 而且也为后续开发方案调整提供了有利依据<sup>[2]</sup>. 储层评价的方法较多, 总体

① 基金项目:国家自然科学基金(61201118)

收稿时间:2015-12-08;收到修改稿时间:2016-01-27 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005300]

上可分为定性评价和定量评价两大类, 各类方法都有其优点和缺点<sup>[3]</sup>.

层次分析法(AHP, Analytic Hierarchy Process)的首次提出在 20 世纪 70 年代, 它是在管理、金融、经济、国防等领域都有着广泛应用的评估方法. AHP 方法将定性分析上升到定量分析, 适用于对复杂系统进行综合评价<sup>[4]</sup>. 目前大多数的评估所采用的方法都是 AHP 方法, 但 AHP 方法在实际应用中存在的问题较多, 如专家构造判断矩阵时主观性较强, 构造的判断矩阵具有不一致性等<sup>[5]</sup>.

本文提出一种基于改进 AHP 的储层综合评价方法. 该方法在构建判断矩阵时, 采用群组专家打分以降低主观性偏见, 再通过构建拟优一致矩阵, 解决判断矩阵的不一致性问题, 之后又将 AHP 方法与效用函数法、灰色层次分析法结合起来, 对储层进行综合评价.

### 1 储层综合评价方法

本文针对 AHP 方法在实际应用中遇到的主观性强、判断矩阵不一致等问题对 AHP 方法进行改进, 提出了一种基于改进 AHP 的储层综合评价方法, 该方法分为 4 步: 选择评价指标、确定指标权重、单项指标评价、综合评价.

#### 1.1 选择评价指标

Delphi 法是专家咨询法的一种, 它可以使多位专家的意见有效的集中起来<sup>[6]</sup>. 本文采用 Delphi 法得到储层综合评价指标.

假设存在评判对象的指标集:  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ , 其中  $U_i (i \in [1, n])$  是  $U$  中的一个指标.  $U_{ij} = \{U_{ij1}, U_{ij2}, \dots, U_{ijn}\}$  是  $U_i$  中的第  $j (j \in [1, n])$  个指标的指标集. 评价指标的结构模型如图 1 所示.

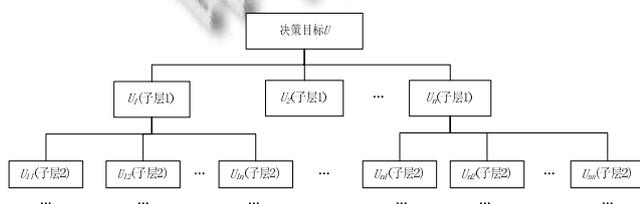


图 1 评价指标结构模型图

#### 1.2 确定指标权重

##### 1.2.1 构建判断矩阵

组织专家对各评价指标用 1~9 标度方法进行两两

比较打分, 从而构造判断矩阵  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ , 其中  $a_{ij}$  是指标  $U_i$  和  $U_j$  的相对重要性之比. 表 1 列出了 1~9 标度的含义.

表 1 1~9 标度含义表

重要性标度	含义
1	两个指标一样重要
3	两个指标前者比后者稍微重要
5	两个指标前者比后者明显重要
7	两个指标前者比后者强烈重要
9	两个指标前者比后者极端重要
2,4,6,8	介于对应 1~9 标度的中间值
倒数	若指标 $i$ 与指标 $j$ 的比是 $a_{ij}$ , 那么指标 $j$ 与指标 $i$ 的比是 $a_{ji} = 1/a_{ij}$

在传统 AHP 方法中, 层次结构模型中各因素的权重是根据单个专家对层次结构模型中各因素的重要性对比计算出的. 专家往往根据以往的学术水平、工作经验、对决策问题的熟悉程度等对比各因素的重要性程度. 但在实际工作中, 当涉及到多准则、多因素的重要问题决策时, 单个专家往往难以胜任决策问题的复杂性, 评估结果带有主观随意性、客观性较差等弊端, 为了尽可能消除这种不一致的情况, 本文引入群组决策对 AHP 的主观偏差进行修正, 以降低主观性偏见. 群组决策先由各决策者分别作出自己的判断, 然后再将这种判断信息按照下述方法集成为群体决策结果, 形成更加客观合理的群体决策结果.

假设有  $S$  个专家, 专家打分后, 可以得到  $S$  个判断矩阵:  $A^1 = (a_{ij}^1)_{n \times n}, A^2 = (a_{ij}^2)_{n \times n}, \dots, A^S = (a_{ij}^S)_{n \times n}$ , 其中  $A^1$  是第一位专家打分后构造的判断矩阵,  $A^2$  是第二位专家打分后构造的判断矩阵, ...,  $A^S$  是第  $S$  位专家打分后构造的判断矩阵, 那么:

$$a_{ij} = \frac{1}{S} (a_{ij}^1 + a_{ij}^2 + \dots + a_{ij}^S) \tag{1}$$

计算  $a_{ij}$  的标准差:

$$\sigma_{ij} = \sqrt{\frac{1}{S-1} \sum_{k=1}^S (a_{ij}^k - a_{ij})^2} \tag{2}$$

若  $\sigma_{ij} < \varepsilon_{ij} (\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} a_{ij})$ , 则认为这  $S$  个专家的打分通过, 否则反馈给专家, 从新打分直到  $\sigma_{ij} < \varepsilon_{ij}$ . 此时,  $A = (a_{ij})_{n \times n}$ . 采用同样的方法依次构造下层判断矩阵  $A_1, A_2, \dots$ .

##### 1.2.2 构建拟优一致矩阵

传统 AHP 方法存在一定的局限性, 在构造判断矩

阵时, 因是仅凭个人经验的人为定性, 所以构造的判断矩阵不一定满足一致性要求<sup>[7]</sup>. 本文引入最优传递矩阵的概念, 求出满足一致性要求的拟优一致矩阵, 避免不一致性问题.

实数矩阵  $A=[a_{ij}], B=[b_{ij}], C=[c_{ij}], A, B, C \in R^{n \times n}$ , 若  $A$  为构造的判断矩阵, 那么  $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ ,  $A$  为互反矩阵. 设:

$$B = \lg A (b_{ij} = \lg a_{ij}, \forall i, j) \quad (3)$$

$$A = 10^B (a_{ij} = 10^{b_{ij}}, \forall i, j) \quad (4)$$

那么  $b_{ij} = \lg a_{ij} = \lg \frac{1}{a_{ji}} = \lg 1 - \lg a_{ji} = -\lg a_{ji} = -b_{ji}$

所以  $B$  满足  $b_{ij} = -b_{ji}$ ,  $B$  是反对称矩阵. 若  $B$  是反对称矩阵同时又为传递矩阵, 则需满足:

$$b_{ij} = b_{ik} - b_{jk} \quad (5)$$

由式(4), 式(5)可知:

$$a_{ij} = 10^{b_{ij}} = 10^{b_{ik} - b_{jk}} = \frac{10^{b_{ik}}}{10^{b_{jk}}} = \frac{a_{ik}}{a_{jk}}$$

所以矩阵  $A$  满足  $a_{ij} = \frac{a_{ik}}{a_{jk}}$ , 即  $A$  为一致阵. 为了满足  $A$  的一致性, 可以通过求  $B$  的最优传递矩阵  $C$  来实现  $A$  的拟优传递. 要想构造传递矩阵  $C=(c_{ij})_{n \times n}$ , 必须满足  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (c_{ij} - b_{ij})^2$  最小(根据最小二乘原理), 令:

$$J_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (c_{ik} - b_{jk})^2, \quad J_2 = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n (c_{jk} - b_{ik})^2.$$

$C$  是传递的, 则存在  $x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$ , 使  $c_{ik} = x_i - x_k, c_{jk} = x_j - x_k$ , 则:

$$J_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (x_i - x_k - b_{jk})^2, \quad J_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n (x_j - x_k - b_{jk})^2$$

为满足  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (c_{ij} - b_{ij})^2$  最小, 则  $J_1, J_2$  应最小, 根据最小二乘原理, 为求  $\min J_1, \min J_2$ , 就是使  $\frac{\partial J_1}{\partial x_i} = 0, \forall i, \frac{\partial J_2}{\partial x_i} = 0, \forall i$ , 而:

$$\frac{\partial J_1}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^n 2(x_i - x_k - b_{jk}) - \sum_{k=1}^n 2(x_k - x_i - b_{jk}) = 0$$

$$\frac{\partial J_2}{\partial x_i} = \sum_{k=1}^n 2(x_j - x_k - b_{ik}) - \sum_{k=1}^n 2(x_k - x_j - b_{ik}) = 0$$

$$\text{即 } \sum_{k=1}^n (x_k - x_i - b_{jk}) = 0, \quad \sum_{k=1}^n (x_k - x_j - b_{ik}) = 0, \quad \text{即}$$

$$x_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k) - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{jk}), \quad x_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k) - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik}). \quad \text{于是:}$$

$$c_{ij} = x_i - x_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (b_{ik} - b_{jk}) \quad (6)$$

设有一矩阵  $A^*$ :

$$A^* = [a_{ij}^*] = [10^{c_{ij}}] \quad (7)$$

则  $A^*$  为  $A$  的一个拟优一致矩阵, 矩阵  $A^*$  满足一致性.

### 1.2.3 计算指标权重

设  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$  为  $U$  中各指标的权重, 且满足  $\sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n$ . 若根据拟优一致矩阵  $A^*$  计算出指标  $U_i$  中的各指标关于上层某指标的权重, 就要计算矩阵  $A^*$  的特征向量  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ , 采用方根法求解特征向量的值<sup>[8]</sup>:

$$1) A^* \text{ 的元素按行相乘: } a_i^* = \prod_{j=1}^n a_{ij}^*$$

2) 所得的乘积  $a_i^*$  分别开  $n$  次方:

$$a_i = \sqrt[n]{a_i^*} (i = 1, 2, \dots, n)$$

3) 对方根向量归一化, 即可得到特征向量  $W$ , 其中:

$$w_i = \frac{a_i}{\sum_{j=1}^n a_j} (i = 1, 2, \dots, n)$$

### 1.3 单项指标评价

对于各项指标, 它们性能值的量纲不一致, 而且性能值的相关特性也不同<sup>[9]</sup>. 因此, 本文将底层指标分为两类, 一类为定量指标, 一类为定性指标, 分别采用不同的方法计算各项指标的评价分数, 再得到评价矩阵  $R$ , 设  $R=(r_{ij})_{n \times m}$  是单项指标评价矩阵.

#### 1.3.1 定性指标评价

对定性指标采用专家打分法, 邀请专家为各项指标打分. 设模糊评判集为  $V = \{V_1, V_2, \dots, V_m\}$ , 其中  $V_j (j = 1, 2, \dots, m)$  表示由高到低的评语, 如采用“较差, 差, 中, 良, 优”的五级评语或“最差, 很差, 差, 较差, 中, 较好, 好, 很好, 最好”的九级评语, 具体方式通常根据具体情况而定. 此时指标评价矩阵中的元素  $r_{ij}$  表示指标  $U_i$  被评为  $V_i$  的隶属度. 设  $m$  为对指标  $U_i$  有效咨询的次数,  $z_{ij}$  为指标  $U_i$  被评为  $V_j$  的次数, 则  $r_{ij} = \frac{z_{ij}}{m}$ , 则指标  $U_i$  的评价向量  $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im})$ .

#### 1.3.2 定量指标评价

对于定量指标, 它们的性能要求各不相同, 有的要求值越大越好, 如渗透率、孔隙度; 有的要求值越小越好, 如排驱压力, 中值压力; 还有的要求值在一定

范围内<sup>[10]</sup>。因此很难对它们进行评价,所以采用效用函数法,先进行统一的量化处理,得到各项指标的评价值,再采用灰色层次分析法,得到各项指标的评价向量。

1) 效用函数法

设  $n$  个定量指标的性能值为  $d = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ , 这些指标的最大值集合为  $d_{\max} = \{d_{\max 1}, d_{\max 2}, \dots, d_{\max n}\}$ , 最小值集合为  $d_{\min} = \{d_{\min 1}, d_{\min 2}, \dots, d_{\min n}\}$ , 其中,  $d_j, d_{\max j}, d_{\min j}$  为第  $j$  项指标, 第  $j$  项指标的最大值和第  $j$  项指标的最小值,  $d_j \in [d_{\min j}, d_{\max j}]$ , 各项指标的效用函数如下:

A. 趋大优型. 指标  $d_j$  要求越大越好, 则效用函数值  $x_j$  为:

$$x_j = \frac{d_j}{d_{\max j}} \quad (8)$$

B. 趋小优型. 指标  $d_j$  要求越小越好, 则效用函数值  $x_j$  为:

$$x_j = 1 - \frac{(d_j - d_{\min j})}{d_{\max j}} \quad (9)$$

C. 区间优型. 指标  $d_j$  要求在  $[d_p, d_h]$  范围内为最佳, 则效用函数值  $x_j$  为:

$$x_j = \begin{cases} \frac{d_j}{d_f}, & d_j \in [d_{\min j}, d_l] \\ 1, & d_j \in [d_p, d_h] \\ 1 - \frac{(d_j - d_l)}{d_{\max j}}, & d_j \in [d_h, d_{\max j}] \end{cases} \quad (10)$$

2) 灰色层次分析法

在对指标进行评价前, 首先要确定评估灰类的等级数、灰类的灰数及灰数的白化权函数. 本文将指标的评分等级分为甲、乙、丙、丁、戊五个等级, 分别给予相应的分值为 9、7、5、3、1. 这五个等级对应的评价灰类, 相应的灰数和白化权函数参考文献<sup>[11]</sup>, 如下所示:

第一类“甲”, 设定灰数  $\Theta_1 \in [0, 9, +\infty)$ , 白化权函数为  $f_1$ :

$$f_1 = \begin{cases} \frac{1}{9}x & 0 < x < 9 \\ 1 & x \geq 9 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

第二类“乙”, 设定灰数  $\Theta_2 \in [0, 7, 10)$ , 白化权函数为  $f_2$ :

$$f_2 = \begin{cases} 1 & 0 < x \leq 7 \\ \frac{10-x}{3} & 7 < x \leq 10 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

第三类“丙”, 设定灰数  $\Theta_3 \in [0, 5, 8)$ , 白化权函数为  $f_3$ :

$$f_3 = \begin{cases} 1 & 0 < x \leq 5 \\ \frac{8-x}{3} & 5 < x \leq 8 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

第四类“丁”, 设定灰数  $\Theta_4 \in [0, 3, 6)$ , 白化权函数为  $f_4$ :

$$f_4 = \begin{cases} 1 & 0 < x \leq 3 \\ \frac{6-x}{3} & 3 < x \leq 6 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

第五类“戊”, 设定灰数  $\Theta_5 \in [0, 1, 3)$ , 白化权函数为  $f_5$ :

$$f_5 = \begin{cases} 1 & 0 < x \leq 1 \\ \frac{3-x}{2} & 1 < x \leq 3 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

对于指标  $U_i$ , 属于第  $e (e=1, 2, \dots, 5)$  个评估灰类的灰色评估系数  $y_{ie}$  的计算公式为:

$$y_{ie} = f_e(9 \cdot x_i) \quad (11)$$

灰色总评估系数  $y_i$  的计算公式为:

$$y_i = \sum_{e=1}^5 f_e(y_{ie}) \quad (12)$$

对于指标  $U_i$ , 第  $e$  个灰类的评价数  $r_{ie}$  的计算公式为:

$$r_{ie} = \frac{y_{ie}}{y_i} \quad (13)$$

则指标  $U_i$  关于各个评价灰类的评价向量为  $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{i5})$ .

1.4 综合评价

由于评价对象的指标较多, 故采用多级评价, 自下而上进行评价. 先将指标  $U_i$  的综合评价结果记为  $Z_i$ , 则  $Z_i = W_i \cdot R_i$ , 得到矩阵  $R = [Z_1, Z_2, \dots, Z_n]^T$ . 再对  $U$  做综合评价, 结果记为  $Z$ , 则  $Z = W \cdot R$ . 此时的综合评价结果  $Z$  是一个向量, 还不能直接体现总体效能, 因此需要对  $Z$  做进一步处理, 使  $Z$  单值化, 得到效能评估值  $E$ :

$$E = Z \cdot L$$

其中  $L = [l_1, l_2, \dots, l_n]^T$ , 为各等级的评分值.

## 2 应用实例

根据上述原理和模型,以鄂尔多斯盆地安塞油田长6油层组为例,进行储层综合评价。

### 2.1 选择评价指标

在储层综合评价中,各类指标优选决定着分类结果的准确性,因此正确选取各类指标是储层综合分类评价的基础。针对研究区低渗、强非均质性的特点,在本次评价指标选取时主要遵循以下两点原则:

1)以研究区各类指标对于储层的综合影响程度和各指标间的相互作用关系为依据。

2)以选取研究区中具有代表性和决定性的参数为依据。

研究区长6储层无论层内、层间,还是平面、微观均显示出强非均质性,这就决定了各小层间和不同沉积微相及砂体区带不同程度的差异。成岩作用及微观孔吼特征分析显示,本区成岩作用类型多样,储层受成岩作用改造强烈,反映在微观孔吼及渗流特征上的复杂多变。依据上述原则,结合研究区实际选取油层物性参数、孔隙结构参数、油藏地质特征三个方面开展评价工作。

1)油层物性参数:作为宏观性评价指标,其本质在于评价油层储集能力及渗流特征的优劣。其中集储能力通过砂体厚度、油层厚度、孔隙度、含油饱和度和

来评价,而渗流特征通过渗透率来衡量。

2)孔隙结构参数:作为微观性评价指标,该类参数主要用于评价砂岩微观孔喉结构对于储层流体渗流特征的影响。例如:孔吼组合形式越复杂,中值半径越低,排驱压力越大,则渗透率越低。

3)油藏地质特征:作为本次评价中选择的定性指标,沉积作用、成岩作用的改变直接影响着上述物性参数的变化。例如:在利于油气藏的河道相中上述物性参数均优于分流间湾相;同时,强压实作用则会造成孔隙的破坏及喉道的压缩,导致渗透率下降。

根据上述三方面,本文优选出砂体厚度、油层厚度、孔隙度等参数,建立的储层分类评价指标如下: $U = \{U_1, U_2, U_3\}$ ,  $U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}\}$ ,  $U_2 = \{U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}\}$ ,  $U_3 = \{U_{31}, U_{32}\}$ ,评价指标结构如图2所示。

相比研究区普遍使用的鄂尔多斯盆地长4+5~长8统一低渗透层分类标准和鄂尔多斯盆地中生界砂岩储集层分类评价标准,本文提出的指标体系增加了孔隙结构与渗流特征的评价参数和成岩相类型,使其不但可以表现研究区从油藏地质特征到储层宏观、微观的全面性,还可以说明微观与宏观的关联性以及地质作用对储集与渗流的影响,可以更好地适用于研究区的评价工作。

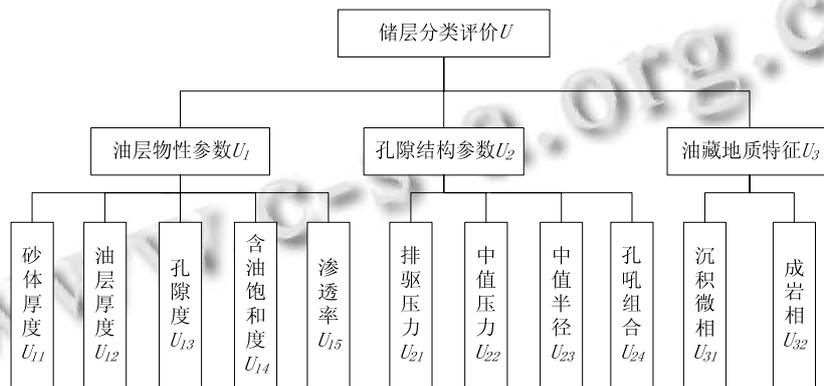


图2 储层分类评价指标图

### 2.2 确定指标权重

#### 2.2.1 构建判断矩阵

令  $S = 5$ , 即选取5位评估专家,采用1.2.1的方法建立判断矩阵,如表2~表6所示。

表2 专家1构建的重要性判断矩阵

$A^1$	$U_1$	$U_2$	$U_3$
$U_1$	1	1	0.333

$U_2$	1	1	0.333
$U_3$	3	3	1

表3 专家2构建的重要性判断矩阵

$A^2$	$U_1$	$U_2$	$U_3$
$U_1$	1	2	0.333
$U_2$	0.5	1	0.333
$U_3$	3	3	1

表 4 专家 3 构建的重要性判断矩阵

$A^3$	$U_1$	$U_2$	$U_3$
$U_1$	1	1	0.5
$U_2$	1	1	0.333
$U_3$	2	3	1

表 5 专家 4 构建的重要性判断矩阵

$A^4$	$U_1$	$U_2$	$U_3$
$U_1$	1	1	0.333
$U_2$	1	1	0.333
$U_3$	3	3	1

表 6 专家 5 构建的重要性判断矩阵

$A^5$	$U_1$	$U_2$	$U_3$
$U_1$	1	1	0.5
$U_2$	1	1	0.333
$U_3$	2	3	1

那么根据公式(1)得:

$$a_{11} = \frac{1}{5}(1+1+1+1+1) = 1$$

$$a_{12} = \frac{1}{5}(1+2+1+1+1) = 1.2$$

$$a_{13} = \frac{1}{5}(0.333+0.333+0.5+0.333+0.5) = 0.4$$

.....

根据公式(2)得:

$$\sigma_{11} = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{k=1}^5 (a_{11} - a_{11}^k)^2} = 0 < \varepsilon_{11}$$

$$\sigma_{12} = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{k=1}^5 (a_{12} - a_{12}^k)^2} = 0.44 < \varepsilon_{12}$$

$$\sigma_{13} = \sqrt{\frac{1}{5-1} \sum_{k=1}^5 (a_{13} - a_{13}^k)^2} = 0.09 < \varepsilon_{13}$$

.....

综合以上结果得到判断矩阵  $A$ , 如表 7 所示:

表 7 指标  $U$  的下层元素的重要性判断矩阵

$A$	$U_1$	$U_2$	$U_3$
$U_1$	1	1.2	0.4
$U_2$	0.9	1	0.333
$U_3$	2.6	3	1

### 2.2.2 构建拟优一致矩阵

根据公式(3)、(6)、(7)可以得到  $A$  的拟优一致矩阵  $A^*$  如表 8 所示:

表 8  $A$  的拟优一致矩阵  $A^*$

$A^*$	$U_1$	$U_2$	$U_3$
$U_1$	1	1.170	0.391
$U_2$	0.868	1	0.333
$U_3$	2.573	2.988	1

### 2.2.3 计算指标权重

根据 1.2.3 的方法得到  $w = (0.226, 0.194, 0.58)$ .

如同步骤 2.2.1~2.2.3 可以得到各指标的权重, 如下所示:

$$w_1 = (0.11, 0.325, 0.108, 0.339, 0.118)$$

$$w_2 = (0.486, 0.223, 0.21, 0.081)$$

$$w_3 = (0.5, 0.5)$$

### 2.3 单项指标评价

以  $U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}, U_{21}, U_{22}, U_{23}, U_{24}, U_{31}, U_{32}$  这些指标为例, 计算底层指标的评价矩阵. 其中  $U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}, U_{21}, U_{22}, U_{23}$  是定量指标,  $U_{24}, U_{31}, U_{32}$  是定性指标.

#### 2.3.1 定性指标评价

对于定性指标采用专家打分法确定其评价向量. 邀请 5 位专家, 采用  $V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\}$ , 即“较差, 差, 中, 良, 优”五级评语对这六个指标进行评价, 结果如表 9 所示.

表 9 专家打分得票数

得票数	$U_{24}$	$U_{31}$	$U_{32}$
$V_1$	3	0	4
$V_2$	2	4	1
$V_3$	0	1	0
$V_4$	0	0	0
$V_5$	0	0	0

根据 1.3.1 的方法, 得到如下评价向量:

$$r_{24} = (0.6, 0.4, 0, 0, 0) \quad r_{31} = (0, 0.8, 0.2, 0, 0) \quad r_{32} = (0.8, 0.2, 0, 0, 0)$$

#### 2.3.2 定量指标评价

对于定量指标首先采用效用函数法计算效用函数值, 再使用灰色评价法计算各指标的评价向量.

##### 1) 计算效用函数值

这些定量指标中,  $U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}, U_{15}, U_{23}$  都属于趋大优型, 而  $U_{21}, U_{22}$ , 属于趋小优型. 则根据公式(8), (9), (10)得到效用函数值, 如下所示:

$$x_{11} = \frac{11.9}{13.2} = 0.90, \quad x_{12} = \frac{7.4}{9.4} = 0.79, \quad x_{13} = \frac{10.3}{12.8} = 0.80,$$

$$x_{14} = \frac{51.7}{68} = 0.76, \quad x_{15} = \frac{1.12}{1.45} = 0.77, \quad x_{21} = 1 - \frac{0.26 - 0.11}{0.62} = 0.76,$$

$$x_{22} = 1 - \frac{1.83 - 0.4}{6.5} = 0.78, \quad x_{23} = \frac{0.29}{0.37} = 0.78.$$

##### 2) 计算评价向量

根据公式(11)得到评价指标  $U_{11}$  属于第  $e(e=1, 2, \dots, 5)$  个评估灰类的灰色评估系数  $y_{111e}$  为:

$$y_{111} = f_1(x_{11}) = 0.90, \quad y_{112} = f_2(x_{11}) = 0.63,$$

$$y_{113} = f_3(x_{11}) = 0, \quad y_{114} = f_4(x_{11}) = 0, \quad y_{115} = f_5(x_{11}) = 0.$$

根据公式(12)得到灰色总评估系数  $y_{11}$  为:

$$y_{11} = 0.90 + 0.63 + 0 + 0 + 0 = 1.53$$

根据公式 (13), 得到指标  $U_{11}$  的评价向量:

$$r_{11} = (0.59, 0.41, 0, 0, 0)$$

同理, 可得到其它各指标的评价向量:

$$r_{12} = (0.39, 0.47, 0.14, 0, 0) \quad r_{13} = (0.4, 0.47, 0.13, 0, 0)$$

$$r_{14} = (0.24, 0.5, 0.25, 0.01, 0) \quad r_{15} = (0.63, 0.37, 0, 0, 0)$$

$$r_{21} = (0.34, 0.48, 0.18, 0, 0) \quad r_{22} = (0.37, 0.47, 0.16, 0, 0)$$

$$r_{23} = (0.44, 0.56, 0, 0, 0)$$

综合各定量指标和定性指标的评价向量, 得到如下评价矩阵:

$$R_{U_1} = \begin{bmatrix} 0.59 & 0.41 & 0 & 0 & 0 \\ 0.39 & 0.47 & 0.14 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.47 & 0.16 & 0 & 0 \\ 0.63 & 0.37 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{U_2} = \begin{bmatrix} 0.34 & 0.48 & 0.18 & 0 & 0 \\ 0.37 & 0.47 & 0.16 & 0 & 0 \\ 0.44 & 0.56 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0.4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_{U_3} = \begin{bmatrix} 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

### 2.4 综合评价

得到各评价矩阵后先进行单项指标评价, 得到:

表 10 长 6 储层分类评价表

分类指标	I	II	III	IV
砂体厚度(m)	>12	9~12	6~9	<6
油层厚度(m)	>8	6~8	4~6	<4
孔隙度(%)	>11	9~11	7~9	<7
含油饱和度	>60%	50%~60%	40%~50%	30%~40%
渗透率( $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	>1.2	0.8~1.2	0.4~0.8	<0.4
排驱压力(Mpa)	<0.16	0.16~0.3	0.3~0.5	>0.5
中值压力(Mpa)	<1	1~3	3~5	>5
中值半径(um)	>0.3	0.3~0.2	0.2~0.08	<0.08
孔喉组合	中孔细喉	中小孔细喉	小细孔微喉	微孔微喉
沉积微相	分流河道相	分流河道相 河道侧翼相	河道侧翼相 分流间湾相	分流间湾相
成岩相	绿泥石薄膜残余 粒间孔相+长石 溶孔相	绿泥石薄膜残余粒 间孔相+长石溶孔相 残余粒间孔相	残余粒间孔相 压实或胶结致密相	压实或胶结致密相

分别运用本文提出的分类评价标准以及长庆油田鄂尔多斯盆地长 4+5~长 8 统一低渗透层分类标准(标准 1)和鄂尔多斯盆地中生界砂岩储集层分类评价标准

$$Z_1 = W_1 R_{U_1} = [0.519 \quad 0.421 \quad 0.06 \quad 0 \quad 0]$$

$$Z_2 = W_2 R_{U_2} = [0.389 \quad 0.488 \quad 0.123 \quad 0 \quad 0]$$

$$Z_3 = W_3 R_{U_3} = [0.4 \quad 0.5 \quad 0.1 \quad 0 \quad 0]$$

$$\text{则 } R_U = \begin{bmatrix} 0.519 & 0.421 & 0.06 & 0 & 0 \\ 0.389 & 0.488 & 0.123 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.5 & 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据一级指标的权重, 进行综合评价, 则:

$$Z = W R_U = [0.425 \quad 0.480 \quad 0.095 \quad 0 \quad 0]$$

各等级的分数为  $L = [90 \quad 70 \quad 50 \quad 30 \quad 10]^T$ , 由此可知综合评价分数为:

$$E = ZL = 76.6$$

### 3 结论

鄂尔多斯盆地安塞油田长 6 油层组具有低孔、低渗以及非均质性强的特征, 对储层的分类评价和预测有较大难度. 结合该研究区的地质特征, 选择资料丰富的 X 井区的 100 口井的指标数据进行实验, 可将储层分为 4 类: I 类储层开发效果好, 综合评价值为 84~100; II 类储层开发效果较好, 综合评价值为 65~84; III 类储层开发效果较差, 综合评价值为 38~65; IV 类储层无工业开发价值, 综合评价值为 0~38. 实验所得的储层分类评价标准如表 10 所示.

(标准 2)计算安塞油田 X 井区长 61 小层组各类储层面积的百分比得到表 11.

表 11 储层分类面积百分比(%)

百分比	本文分类	标准 1	标准 2	试油
I	13.6	11.8	15.7	13.1
II	48.4	48.5	44.9	47.2
III	26.9	26.5	25.5	28.3
IV	11.1	13.2	13.9	11.4

从表 11 的对比可以看出, 根据本文提出的储层综合评价方法得到的储层分类评价标准计算出的储层分类面积比更接近于该井区的探井试油数据, 与实际开发勘探吻合度较高. 本文提出的储层综合评价方法更科学、合理, 提高了储层评价的准确性.

#### 4 结语

本文以鄂尔多斯盆地安塞油田为例, 从该区的地质资料中优选出砂体厚度、油层厚度、含油饱和度、排驱压力、中值半径等评价指标, 运用改进 AHP 计算各指标权重, 再利用本文提出的储层综合评价方法对该油区的长 6 储层进行分类评价. 该方法不仅简便、快速、易操作, 而且评价结果科学、合理, 提高了储层评价的准确性和研究区的开发效果, 并为后续开发方案的调整提供了有利依据.

#### 参考文献

1 车桥, 何文祥. 神木气田太原组储层分类评价研究. 长江大学

学报, 2015, 12(1): 24-27.

- 涂乙, 谢传礼, 刘超, 李佳佳. 灰色关联分析法在青东凹陷储层评价中的应用. 天然气地球科学, 2012, 23(2): 382-386.
- 程启贵, 郭少斌, 王海红, 王成玉等. 鄂尔多斯盆地中西部长 6 油层组储层综合评价. 石油实验地质, 2010, 32(10): 415-419.
- 李浩, 吴帅, 王公宝. 基于 AHP 和 DEA 综合评判的反恐分队综合作战效能评估. 火力与指挥控制, 2013, 38(4): 26-28.
- 谢人强. 基于 AHP 与 FUZZY 的零售型网站评价研究. 计算机应用与软件, 2014, 31(9): 70-73.
- 张拓, 高晓光. 基于灰色 AHP 方法的综合航电系统效能. 火力与指挥控制, 2013, 38(4): 125-129.
- 张延生, 黄考利, 连光耀. 基于改进 AHP 法的导弹装备测试性参数选择方法研究. 计算机测量与控制, 2011, 19(2): 412-414.
- 秦洪涛, 熊金石, 李建华, 等. 基于改进型灰色算法的网络化指挥信息系统效能评估. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(3): 60-64.
- 袁礼, 黄洪, 周绍华. 基于层次分析法的系统安全保护能力评价模型. 计算机仿真, 2011, 28(5): 126-130.
- 肖扬, 杨慧, 丁力, 等. 基于 AHP-模糊综合评价的军事工程生态伪装效能综合评价. 四川建筑科学研究, 2012, 38(4): 348-351.
- 邓聚龙. 灰色系统基本方法. 武汉: 华中工学院出版社, 1987.