

Shale Reservoir Evaluation of Upper Paleozoic in the East Ordos Basin Based on AHP-FCE Method

Chuanhao Sun, Heyang Li, Shaobin Guo*

School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing
Email: Chuanhaosun@163.com, * guosb58@126.com

Received: Mar. 19th, 2015; accepted: Apr. 4th, 2015; published: Apr. 10th, 2015

Copyright © 2015 by authors 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

Abstract

Shale gas reservoir evaluation is the foundation work of selections of shale gas. Since the prevalent shale evaluation model exist some shortcomings, the new evaluation model is proposed in this paper based on the analytical hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive evaluation (FCE). The model taking into account the weight and model selection of two important points, has complementary advantages. The model chooses AHP to determine the weight, and adapts fuzzy comprehensive evaluation. Then the model is adapted to the shale evaluation of Upper Paleozoic in the Eastern Margin of Ordos Basin. Evaluating indicators include organic carbon content (TOC), kerogen type, maturity of organic matter (R_o), effective drainage porosity, percent of crack, content of brittle mineral and thickness, using the trapezoid function description index membership and weight scales of assessment indices are determined by AHP. After evaluation, the conclusion is that the shale in the Taiyuan formation of Upper Paleozoic of Ordos basin is favorable reservoir.

Keywords

Ordos Basin, Shale, Analytic Hierarchy Process (AHP), Fuzzy Comprehensive Evaluation (FCE), Reservoir Evaluation

基于层次分析 - 模糊综合评判法的鄂尔多斯盆地东缘上古生界泥页岩储层评价

孙传皓, 李贺洋, 郭少斌*

*通讯作者。

中国地质大学(北京)能源学院, 北京
Email: Chuanhaosun@163.com, [* guosb58@126.com](mailto:guosb58@126.com)

收稿日期: 2015年3月19日; 录用日期: 2015年4月4日; 发布日期: 2015年4月10日

摘要

泥页岩储层评价是页岩气选区的基础工作, 由于以往的泥页岩评价模型存在一定的不足, 本文提出了基于层次结构分析(AHP)与模糊综合评判法(FCE)结合的评价模型。该模型兼顾了确定权重与模型选取两个重要问题, 形成优势互补。本文选取了层次结构分析法确定权重, 综合模糊评判作为评价模型。将此模型应用于鄂尔多斯盆地东缘上古生界泥页岩储层评价。选取了7个评价指标有机质含量(TOC), 干酪根类型, 有机质成熟度(R_o), 有效孔隙度(ϕ), 裂缝百分数, 脆性矿物含量和厚度, 采用了梯形函数描述评价指标的隶属度, 然后用层次分析法确定了评价指标的权重。经过评价之后, 认为鄂尔多斯盆地上古生界太原组泥页岩是有利储层。

关键词

鄂尔多斯盆地泥页岩, 层次结构分析(AHP), 模糊综合评判(FCE), 储层评价

1. 引言

泥页岩储层综合评价是为了对其做出符合实际地质条件的评价与分类。在前期有机地化特征、物性特征、储集特征等研究的基础上, 评价不同区块、不同层位的储层质量, 以确定勘探方向与开发策略[1]。在泥页岩储层综合评价方面, 国内许多学者做出了有益的探索, 郭少斌等运用灰色关联理论对上扬子地区泥页岩进行评价与分类[2]; 臧东升等采用层次分析法评价了建昌盆地油页岩[3]; 任垒等基于模糊综合评价对四川盆地下侏罗统陆相页岩气优选有利区[4], 结构方程模型和神经智能化方法等方法也有初步应用[5]。

在多指标泥页岩储层评价过程中, 必须要解决两个关键性问题, 一个是如何确定每个因素在多指标体系中的权重问题, 另一个是如何选择合适的综合评价模型。上述方法均有一定的局限性, 特别是不能兼顾权重确定和模型选择两个方面。为了解决这个问题, 本文提出了基于层次分析法(AHP)确定权重与模糊综合评判法结合的泥页岩储层评价方法, 并以鄂尔多斯盆地东缘上古生界为例进行评价分析。

2. 评价模型

2.1. 模糊评价基本原理

模糊综合评价以模糊数学为理论基础。其主要功能是将一些不易量化的因素定量化, 进行全面评价的一种十分有效的多因素决策方法[1]。其基本原理是: 设论域 $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 为 n 种因素, $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$ 为 m 种评判。特别指出的是人们对于 m 种评判并不是百分百地肯定或者否定, 因此综合评判就应该是 V 上的一个模糊子集

$$B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$$

其中 b_j ($j = 1, 2, 3, \dots, m$) 反映了第 j 种评判在 v_j 在评判中所占的地位(也就是 v_j 对模糊集模糊集 B 的隶属度)。综合评判 B 依赖于各个因素的权重, 并且应该是 U 上的模糊子集 $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, 其中 a_i 表示第 i 种因素的权重。因此, 权重一旦给定, 就可以相应地得到一个综合评判 B 。

2.2. 评价步骤

模糊综合评价基本步骤有：确定评价因素，确定评判集，单因素评判，确定权重与综合评判。

2.2.1. 确定评价因素

设有 n 个评价指标，组成评价集合(论域)：

$$U = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n) \quad (1)$$

2.2.2. 确定评判集

n 个评价指标中的每一个指标都有 m 个评判，由 m 个评判组成评判集合

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_m) \quad (2)$$

显然，具体地对每一个目标的评价都是一个相对应的模糊子集。

2.2.3. 单因素评判

构造模糊评判子集后，就要对评价体系中的每个评价指标 $\mu_i (i=1, 2, \dots, n)$ 进行量化评判，即从单个评价指标来看整个被评事物对模糊子集的的隶属度(隶属度是用来描述接近模糊子集的程度)，从而构成了模糊关系矩阵：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵 R 中第 i 行第 j 列元素 r_{ij} 表示的是第 i 个评价指标 u_i 对 v_j 的隶属度(其中 $1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m$)。

2.2.4. 确定评价因素的权重

在模糊综合评价中，确定评价指标的权重，是非常重要的一个步骤。如果确定了整个评价体系中每一个指标在体系中的权限，就相应地得到一个权向量：

$$A = (a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (4)$$

在模糊数学角度看来，权向量 A 中的元素在本质上是一个以被评事物相对重要程度为元素的集合的隶属度。为了最大限度地缩小人为影响程度，本文采用了层次分析法来确定评价指标的权重。

2.2.5. 综合评价

综合评价实质上是矩阵之间的转换。利用模糊关系矩阵(3)与权重向量(4)，得到综合评价结果向量 B ：

$$B = A \cdot R = (a_1, a_2, \dots, a_n) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (5)$$

向量 B 是表示整个评价体系对评判集 V 的隶属度，可以根据最大隶属原则，来做出最终结论。模糊综合评判流程图如图 1。

3. 层次分析法确定权重

求取评价因素权重是综合评价中的关键一步，层次分析法能够有效的解决这个问题。层次结构分析法(Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP)是一种实用的多准则系统分析方法，具有兼顾定性和定量、系

统化、层次化的特点，能够将复杂的问题分解为一个有逻辑的层次结构，通过经验判断对决策方案的优劣进行排序。由于其实用、简洁、系统性强，能够迅速简便地解决复杂问题，已在行为科学、军事指挥、运输、农业等诸多领域得到应用[2]。建立层次结构模型、构造判断矩阵、层次排序及一致性检验是层次分析过程的三个基本步骤

3.1. 建立层次结构

当确定评价体系和评价目标之后，为了使评判变得简洁，需要建立一定的层次结构。一般地有三种系统的递阶层次结构：目标层，准则层和方案层，如图 2。

3.2. 构造判断矩阵

比较 n 各元素对整个体系的影响大小，从而确定它们在体系中的比重。每次取两个评价指标 μ_i 与 μ_j 相互比较，用 c_{ij} 表示 μ_i 与 μ_j 对体系的影响之比。一般地，我们用 1~9 来标度 c_{ij} ， n 个因素两两比较从而构成判断矩阵 C (表 1)：

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1m} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

得到的 c_{ij} 显然满足 $c_{ij} > 0$ ， $c_{ii} = 1$ ， c_{ij} 与 c_{ji} 互为倒数。

3.3. 层次总排序及一致性检验

在构造判断矩阵 C 之后，求出判断矩阵 C 的最大特征值 λ_{max} ，在求出对应的最大特征值的特征向量 W ，

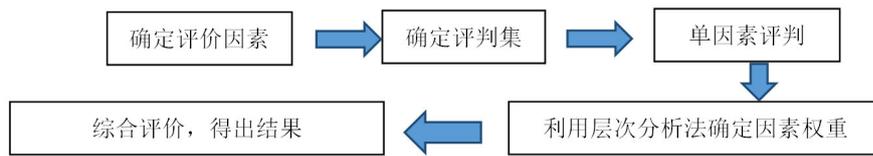


Figure 1. Process of reservoir evaluation in application of FCH

图 1. 模糊综合评判法评价储层步骤

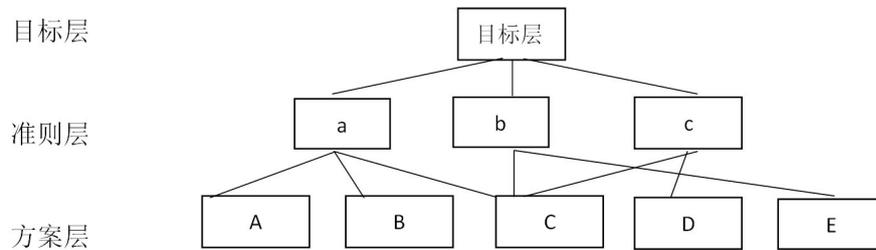


Figure 2. Sketch-map of AHP

图 2. 层次结构示意图

Table 1. Influence degree of evaluation indicator

表 1. 评价指标影响程度

μ_i 比 μ_j	相同	稍强	强	很强	绝对强
c_{ij}	1	3	5	7	9

然后将特征向量 W 归一化,即为同一层次各因素相对于上一层次中某一因素的重要性权重。这一个过程称为层次单排序。在构造判断矩阵两两对比判断时,由于客观事物的复杂性,我们认识带有主观性和片面性,这就体现在判断评价因素对体系影响大小时出现与实际情况不一致的现象[6][7]。用来衡量判断矩阵不一致的程度的数量指标称为一致性指标,记为 CI :

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (7)$$

当 $CI = 0$ 时,判断矩阵是完全一致的。 CI 的值越大,说明不一致性的程度越严重。为了衡量不一致的程度,引入随机一致性指标 CR :

$$CR = CI / RI \quad (8)$$

CR 必须满足条件 $CR < 0.1$ 才可以。 RI 随着矩阵的阶数变化而变化,例如当 $n = 3$ 时, $RI = 0.58$, 当 $n = 4$ 时, $RI = 0.9$ 。

4. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界泥页岩储层评价

4.1. 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是我国大型含油气克拉通盆地,面积约为 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,勘探实践表明,鄂尔多斯盆地油气资源丰富,近年来,盆地内天然气勘探又不断取得新的突破,含气范围进一步扩大,预示着上古生界进行页岩气勘探的良好前景。盆地上古生界地层为连续沉积,经历了由海到陆、经历了由海到陆、从河到湖的沉积环境转变。本溪组早期主要发育生物碎屑泥晶灰岩与碳质泥岩、泥岩及煤不等厚互层[8]。晚期发育了砂泥岩以及泥炭层。太原组暗色泥岩在整个盆地内广泛发育,由盆地中部向盆地东部厚度减薄。山西组以陆相沉积为主,与其他组相比较而言,山西组的泥岩颜色加深,反映了有机质含量增多。

通过对鄂尔多斯盆地东缘晚石炭本溪组,二叠系太原组和山西组野外样品采集,共采集 39 块样品。对样品进行有机地球化学,物性特征等方面测试,获得有关数据资料,如表 2 所示。

4.2. 模糊综合评价

4.2.1. 选取评价因素,构造评判集

鄂尔多斯盆地东缘主要在晚石炭—二叠系由海陆过渡相变为陆相,期间形成的页岩具有埋藏浅,时代新,低成熟度等特点。由于我国页岩气工业相对起步较晚,目前陆相和海陆过渡相的页岩评价仍然处于探索阶段,与已经在南方海相页岩气实现商业化的研究程度比较起来,进展空间仍是很大。通过大量调查地质文献,结合国内外页岩气最新研究进展,特别是借鉴我国已有的陆相和海陆过渡相研究成果,从页岩的生气、储气,易开采性三个方面展开来选取评价因素。从储层的生气能力来看,有机质含量和有机质成熟度占有决定性的作用,有机质成熟度决定了生烃母质是否达到了生烃门限,或者处于有机质演化的何种阶段(生油为主低中成熟阶段或者生气为主的高成熟-过成熟阶段),而干酪根类型虽有影响,但是并不是决定性因素,原因在于有机质只要达到一定的温压条件,都会有生烃过程。泥页岩储气能力受显然受孔隙空间影响,但是作为自生自储的烃源岩,有机质转化为其它物质,会造成空间形成,由于有机质的亲油气性质,会吸附大量的烃类物质。根据北美的研究和工业看,脆性矿物含量是影响开采的最关键的因素,脆性矿物含量越高,越有利于开采。因此最终筛选出如下 7 个因素:有机质含量(TOC),干酪根类型,有机质成熟(R_o)有效孔隙度(ϕ),裂缝百分数,脆性矿物含量和厚度作为地质选取评价因素[9]-[12],这些评价因素构成了论域:

$$U = (TOC, R_o, \phi, \text{裂缝百分数}, \text{脆性矿物含量}, \text{厚度}, \text{干酪根类型}) \quad (9)$$

将评价结果划分为 5 个等级,构成评判集

$$V = (I, II, III, IV, V) \quad (10)$$

其中 I, II, III, IV, V 分别代表十分有利, 比较有利, 中等, 比较不利, 十分不利。I 型储层代表页岩生气能力和储气能力优良, 开采性强; I 型储层类型代表页岩生气能力和储气能力很弱, 开采性很弱; 其它储层类型则在 I 型与 I 型之间波动, 如表 3 所示。

4.2.2. 单因素评判, 确定隶属度矩阵

隶属度用来描述评价因素在评价集(10)的评价值。根据前人研究成果, 以及实际地质情况, 本文选用了梯形函数作为描述隶属度的函数。梯形函数有三种类型, 分别是偏小形, 中间型和偏大型, 能够较好地适用于储层评价指标大小不等、数值相差很大的实际情况。通常偏小形用于 TOC、裂缝百分数和脆性矿物含量, 中间型和偏大型用于孔隙度、成熟度、厚度的单因素的隶属度的求取。

梯形函数形式如下:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b, \\ 1, & b \leq x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d, \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (11)$$

以 R_o 为例进行说明, 按照函数(11)得到如下 5 个对应不同级别的隶属函数

Table 2. Evaluation indicator value of Upper Paleozoic in the east Ordos Basin

表 2. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界评价指标数值

层位	TOC	R_o	Φ	裂缝百分数	脆性矿物含量	厚度	干酪根类型
	/%	/%	/%	/%	/%	/m	
山西组	0.98%	1.33	2.47	2.18	32%	24	III
太原组	1.92%	1.53	2.33	1.33	46%	12	III
本溪组	1.57%	1.69	3.09	1.86	42%	8	III

Table 3. Criteria for classifying Upper Paleozoic in the east Ordos Basin

表 3. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界评价指标标准划分

评价等级	评价参数赋值							评价结果
	TOC	R_o	Φ	裂缝百分数	脆性矿物含量	厚度	干酪根类型	
	/%	/%	/%	/%	/%	/m		
I	≥ 6.0	≥ 2.0	≥ 8.0	≥ 6.0	≥ 40	≥ 50	I	十分有利
II	4.0~6.0	1.5~2.0	4.0~8.0	4.0~6.0	35~40	35~50	II ₁	比较有利
III	2.0~4.0	1.2~1.5	2.0~4.0	2.0~4.0	30~35	20~35	II ₂	中等
IV	1.0~2.0	0.6~1.2	1.0~2.0	1.0~2.0	20~30	10~20	II~III	比较不利
V	0.5~1.0	<0.6	<1.0	<1.0	<20	<10	III	十分不利

$$F_1(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.8 \\ \frac{x-0.8}{0.2}, & 0.8 < x < 1.0 \\ 0, & 1.0 \leq x \end{cases} \quad (12)$$

$$F_2(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.8, \\ \frac{x-0.8}{0.2}, & 0.8 < x < 1.0, \\ 1, & 1.0 \leq x \leq 1.2, \\ \frac{x-1.2}{0.2}, & 1.2 < x < 1.4, \\ 0, & x \geq 1.4, \end{cases} \quad (13)$$

$$F_3(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.8, \\ \frac{1.4-x}{0.2}, & 0.8 < x < 1.4, \\ 1, & 1.4 \leq x \leq 1.6, \\ \frac{1.8-x}{0.2}, & 1.6 < x < 1.8, \\ 0, & x \geq 1.8, \end{cases} \quad (14)$$

$$F_4(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 1.6 \\ \frac{x-1.6}{0.2}, & 1.6 < x < 1.8 \\ 1, & 1.8 \leq x \leq 2.0 \\ \frac{x-2.0}{0.2}, & 2.0 < x < 2.2 \\ 0, & x \geq 2.2 \end{cases} \quad (15)$$

$$F_5(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 2.0, \\ \frac{x-2.0}{0.2}, & 2.0 < x < 2.2, \\ 1, & 2.2 \leq x, \end{cases} \quad (16)$$

以山西组为例说明。将山西组的 R_O (表 1) 实际值代入上述五个隶属梯形函数，得到一个模糊向量 (0,0.65,0.35,0,0)。以此类推，对每一个评价指标都求出相应的模糊向量。对于干酪根类型，可以采取较为简便的方法来确定，根据专家赋值法，赋予 I (0.9) II₁ (0.85) II₂ (0.8) III (0.7)，然后给出评价值分别为 0.6，0.7，0.8，0.7。最终结果得到山西组单因素隶属度矩阵：

$$R_{\text{山西组}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.65 & 0 \\ 0 & 0.65 & 0.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.85 & 0.27 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 & 0.36 & 0 \\ 0 & 1 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

4.2.3. 确定评级指标权重

首先确立层次结构图 3:

然后构造判断矩阵。根据前人研究观点，首先构造目标层与准则层判断矩阵：

泥页岩	生气能力	储气能力	易开采性
生气能力	1	1	3
储气能力		1	2
易开采性			1

求得矩阵 $\lambda_{\max} = 3.0154$ ，最大特征向量 $W = (0.4434, 0.3874, 0.1692)$ 。进行一致性检验：
 $CI = (\lambda_{\max} - 3) / (3 - 1) = 0.0077$ ， $CR = CI / RI = 0.01 < 0.1$ 。其中生气能力，储气能力，易开采性的权重分别为 0.4434, 0.3874, 0.1692。

依次类推，分别构造准则层与方案层判断矩阵：

生气能力	TOC	R_o	干酪根类型	深度
TOC	1	1	3	5
RO		1	5	3
干酪根类型			1	2
深度				1

求得 TOC, R_o , 干酪根类型, 深度对于生气能力权重分别为 0.3962, 0.3962, 0.1216, 0.0860。

储气能力	TOC	Φ	裂缝百分数	易开采性	裂缝百分数	脆性矿物含量	厚度
TOC	1	2	3	裂缝百分数	1	1/2	3
Φ		1	2	脆性矿物含量		1	3
裂缝百分数			1	深度			1

求得 TOC, Φ , 裂缝百分数对于储气能力权重分别为 0.5278, 0.3325, 0.1396；裂缝百分数, 脆性矿物含量, 深度对于易开采性的权重分别为 0.3325, 0.5278, 0.1396。最后整合 7 个评价指标有机质含量(TOC), 干酪根类型, 有机质成熟(R_o)有效孔隙度(ϕ), 裂缝百分数, 脆性矿物含量和厚度相对于目标层权重向量为：

$$A_{\text{山西组}} = (0.3801, 0.0539, 0.1757, 0.1288, 0.1104, 0.0893, 0.0618) \quad (18)$$

4.2.4. 综合评价

利用公式(5)求得山西组评价向量为：

$$B_{\text{山西组}} = A_{\text{山西组}} \cdot R_{\text{山西组}} = (0, 0.22, 0.43, 0.34, 0)$$

所以山西组最接近于III类储层。

依照以上步骤及原理，对太原组和本溪组泥页岩储层评价，如表 4。

根据最大隶属度原则，鄂尔多斯盆地东缘上古生界泥页岩三个层位中最有利的层位是太原组，是页岩气勘探的比较有利的层位。

从本方法的研究结论看，与其他方法研究结论趋于一致，说明本方法在实际研究过程中确实行之有效。

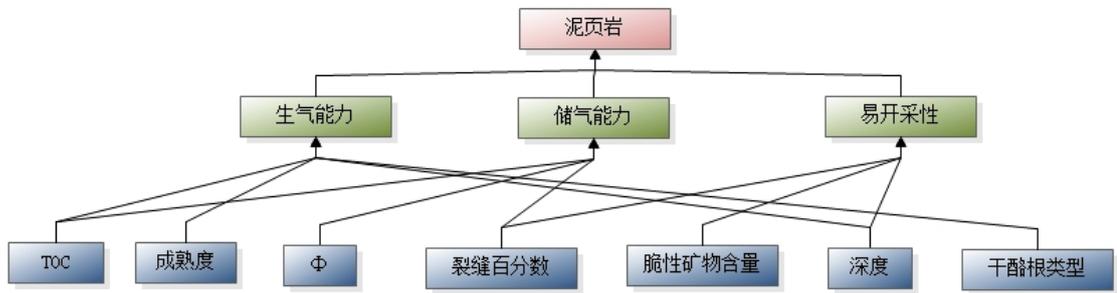


Figure 3. Hierarchical Chart of shale evaluation

图 3. 泥页岩评价层次结构图

Table 4. Result of shale reservoir of Upper Paleozoic in the east Ordos Basin on FCH

表 4. 鄂尔多斯盆地东缘上古生界泥页岩储层模糊综合评价结果

层位	评价等级					评价结果
	I	II	III	IV	V	
山西组	0	0.22	0.43	0.34	0	中等
太原组	0	0.52	0.33	0.15	0	比较有利
本溪组	0	0.37	0.39	0.26	0	中等

5. 结论

1) 针对研究程度尚浅的陆相和海陆过渡相泥页岩, 本文提出了层次结构分析与模糊综合评价相结合的泥页岩储层评价方法, 并运用于鄂尔多斯盆地东缘上古生界, 对有利层位进行预测。

2) 页岩气地质选区评价受控于多种因素, 合理选择页岩气地质选区评价指标并进行分析, 可以有效预测页岩气有利区或者有利层位, 为进一步勘探决策提供参考。

3) 对鄂尔多斯盆地东缘上古生界泥页岩模糊综合评价, 认为太原组是比较有利的储层, 与本溪组和山西组比较而言应该是优先选择的有利层位。

基金项目

国土资源部 2012 年度“鄂尔多斯盆地上古生界页岩气资源潜力调查评价与选区”专项资助部分成果 (2009QYXQ15-07-05)。

参考文献 (References)

- [1] 侯读杰, 包书景, 毛小平, 等 (2012) 页岩气资源潜力评价的几个关键问题讨论. *地球科学与环境学报*, **03**, 7-16.
- [2] 黄磊 (2013) 页岩气储层含气性影响因素及储层评价——以上扬子古生界页岩气储层为例. *石油实验地质*, **06**, 601-606.
- [3] 臧东升, 王嗣敏, 柴立满, 等 (2014) 层次分析法在建昌盆地油页岩勘查有利区优选中的应用. *西安科技大学学报*, **02**, 180-187.
- [4] 任垒, 窦斌, 刘国良, 等 (2012) 基于模糊综合评价法的四川盆地地下侏罗统陆相页岩气地质选区. *石油天然气学报*, **09**, 177-180+3.
- [5] 张雪芬, 陆现彩, 张林晔, 等 (2010) 页岩气的赋存形式研究及其石油地质意义. *地球科学进展*, **06**, 597-604.
- [6] 谢季坚, 刘成平 (2013) 模糊数学方法及其应用. 华中科技大学出版社, 武汉, 2, 145-150.
- [7] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等 (2012) 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究. *数学的实践与认识*, **07**, 93-100.
- [8] 杨华, 付金华, 刘新社, 等 (2012) 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发. *石油勘探与开发*, **03**,

295-303.

- [9] 刘育骥, 耿新宇, 肖辞源 (1994) 石油工程模糊数学. 成都科技大学出版社, 成都, 71-72.
- [10] 范柏江, 师良, 庞雄奇 (2011) 页岩气成藏特点及勘探选区条件. *油气地质与采收率*, **06**, 9-13+111.
- [11] 王香增, 张金川, 曹金舟, 等 (2012) 陆相页岩气资源评价初探:以延长直罗一下寺湾区中生界长7段为例. *地学前缘*, **02**, 192-197.
- [12] 王世谦, 王书彦, 满玲, 等 (2013) 页岩气选区评价方法与关键参数. *成都理工大学学报(自然科学版)*, **06**, 609-620.