

灰色评价熵模型在含油面积评价中的应用

黄石岩

(中国石油化工有限公司, 北京 100029)

摘要: 针对目前灰色关联分析方法在评价岩性、物性、含油性、含油面积等地质模型中有时存在评价结果分辨率不高的问题, 基于信息论中 Jaynes 最大信息熵原理和灰色关联度的定义, 构造目标函数, 运用拉格朗日乘法, 建立了一种新的灰色精细评价模型。结合实例说明了模型的具体应用, 并与原灰色关联分析方法进行了对比, 结果基本一致, 而且明显提高了分辨率。该模型数学推导严谨, 可靠性高, 具有较高的灵敏度。

关键词: 含油面积; 熵; 关联分析; 评价

中图分类号: TE121.1

文献标识码: A

灰色系统预测和评价油田的地质状况和含油级别, 用灰色关联度表示待评价样本与各级别间的相似程度, 是一种用新的完全不同的思维方式来实现油层的测井、沉积相、岩心、试油的综合解释。“灰”是信息不完全的意思, “灰色系统”是信息不完全的系统, 灰关联度分析的主要特点是着眼于系统发展过程的量化分析, 即根据因素间的相似或相异程度来衡量因素间的接近程度^[1-4]。它只着重于整体特征的分析, 因而对样本量的大小无特殊要求, 也不需要以典型的统计分布为前提。但直接用灰色关联度划分油层含油面积级别还存在以下不足: 一是评价结果的分辨率低, 有时候甚至出现与实际不符的情况, 其分类依据不充分, 仅能勉强划分; 二是评价价值趋于均化, 不易区分两级别间的差异。为此, 本文根据灰色关联分析的原理, 在原评价模型的基础上引入信息论中最大熵原理, 提出一种新的地质评价模型。它不仅具有灰色关联分析方法的优点, 而且考虑了随机性所带来的不确定性影响, 模型的分辨率和可靠性都有很大提高。

1 灰色系统熵模型

通俗地说, 熵是一个系统有序化程度的量度, 孤立系统总是从有序向无序方向变化的。将这一思想运用于含油面积评价中, 就是将影响含油面积评价的所有参数依据熵运算的结果进行综合评价, 即根据熵模型进行评价。

1.1 评价标准、权系数及分析准则

灰色关联分析方法的标准和权系数是利用测井地质关系数据库, 分别以某参数对油田目

收稿日期: 2005-11-23

基金项目: 中国石油化工集团公司“十五”攻关项目(T00010)成果。

作者简介: 黄石岩(1966-), 男, 高级工程师, 从事油田开发地质学的科研及管理工作。

的层的地质参数进行统计确定的。

采用统计平均数据列为 X_{oi} 地层评价标准 (岩性、物性、含油性等地质参数 n 级分类标准):

$$X_{oi} = \{X_{oi}(1), X_{oi}(2), \dots, X_{oi}(n)\} \quad (1)$$

以标准指标绝对差大小 $|X_{oi}(k) - X_{oi+1}(k)|$ 作为准确率; 用标准离差平方和的方根大小 $\sqrt{\sigma_i^2(k) + \sigma_{i+1}^2(k)}$ 作为分辨率, 利用准确率和分辨率组合建立评价标准的权系数^[4-5]:

$$Y_{oi}(k) = \frac{|X_{oi}(k) - X_{oi+1}(k)|}{\sqrt{\sigma_i^2(k) + \sigma_{i+1}^2(k)}} \quad (2)$$

上述两式中 $i=1, 2, \dots, m-1; k=1, 2, \dots, n$ 。

对于相邻权系数 ($i=2, \dots, m-1$), 采用左右平均值处理:

$$Y_{oi}(k) = [Y_{oi}(k) + Y_{oi+1}(k)]/2 \quad (3)$$

对于边际权系数, 分左、右进行单边处理:

$$\text{左边} \quad Y_{oi}(k) = Y_{oi}(k) \quad (i=1) \quad (4)$$

$$\text{右边} \quad Y_{oi}(k) = Y_{oi-1}(k) \quad (i=m) \quad (5)$$

然后, 对评价标准的权系数进行标准化处理:

$$Y_i(k) = \frac{Y_{oi}(k)}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_{oi}(k)} \quad (6)$$

1.2 计算灰色关联矩阵

采用上述参数、标准及权系数, 利用工作区目的层段具有代表性的测井、地质及油田开发资料, 作灰色多元加权归一分析处理时, 由于采用数据列量及其单位初值不同, 一般利用矩阵作数据列伸缩处理后, 对系统包含的各种因素 (包括已知和未知的) 按数据单位类别进行标准化, 使之产生无量纲和归一化的数据列。

初始评价数据列 X 、被比较数据列 X_{oi} 表示为:

$$X = \{X(1), X(2), \dots, X(n)\} \quad (7)$$

$$X_{oi} = \{X_{oi}(1), X_{oi}(2), \dots, X_{oi}(n)\} \quad (8)$$

采用地层评价参数及层点数据标准化方法, 对以上地层评价数据列 X 、被比较数据列 X_{oi} 进行均值标准化处理, 使之成为无量纲、标准化的数据 $X_0(k)$, $X_i(k)$ ^[3-7]:

$$X_0(k) = \frac{X(k)}{\frac{1}{m+1} \left[\sum_{i=1}^m X_{oi}(k) + X(k) \right]} \quad (9)$$

$$X_i(k) = \frac{X_{oi}(k)}{\frac{1}{m+1} \left[\sum_{i=1}^m X_{oi}(k) + X(k) \right]} \quad (10)$$

式中 $k=1, 2, \dots, n; i=1, 2, \dots, m$ 。

标准化后的地层评价数据列 $X_0(k)$ 、被比较数据列 $X_i(k)$ 、权系数数据列 $Y_i(k)$ 和参数给定权值数据列 $Y_0(k)$ 表示为:

$$X_0(k) = \{X_0(1), X_0(2), \dots, X_0(n)\} \quad (11)$$

$$X_i(k) = \{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\} \quad (12)$$

$$Y_i(k) = \{Y_i(1), Y_i(2), \dots, Y_i(n)\} \quad (13)$$

$$Y_0(k) = \{Y_0(1), Y_0(2), \dots, Y_0(n)\} \quad (14)$$

然后, 采用层点标准指标绝对差的极值加权组合放大技术, 由下式计算灰色多元加权系数:

$$P_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta_i(k) + A \max_i \max_k \Delta_i(k)}{A \max_i \max_k \Delta_i(k) + \Delta_i(k)} \cdot Y_0(k) \quad (15)$$

$$\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)| \quad (16)$$

式中 $P_i(k)$ ——数据 X_0 与 X_i 在第 k 点 (参数) 的灰色多元加权系数;

$\min_i \min_k \Delta_i(k)$ ——标准指标两级最小差;

$\max_i \max_k \Delta_i(k)$ ——标准指标两级最大差;

$\Delta_i(k)$ ——第 k 点 X_0 与 X_i 的标准指标绝对差;

$Y_0(k)$ ——第 k 点 (参数) 的权值;

A ——灰色分辨系数。

从而可以得出灰色加权系数序列:

$$P_i(k) = \{P_i(1), P_i(2), \dots, P_i(n)\} \quad (17)$$

由于系数较多, 信息过于分散, 不便于优选, 采用综合归一技术, 将各点 (参数及权) 系数集中为一个值, 其表达式为:

$$P_i = \frac{1}{\sum_{k=1}^n Y_0(k)} \sum_{k=1}^n P_i(k) \quad (18)$$

$$Y_i = \frac{1}{\sum_{k=1}^n Y_0(k)} \sum_{k=1}^n Y_i(k) \quad (19)$$

式中 P_i ——灰色多元加权归一系数的行矩阵;

Y_i ——相应的灰色多元加权归一权系数矩阵。

1.3 建立熵模型

将初始评价参数与第 i 级标准间的相似程度用初始评价参数与各标准的差异度 U_i 为加权广义距离来表示, 即

$$d(x, x_{0i}) = U_i P_i \quad (20)$$

由于地层评价参数数值和各标准本身具有一定的模糊性, 使得 U_i 的确定具有不确定性。为了描述这种不确定性, 可理解为初始评价参数属于第 I 级标准的概率, 这种不确定性可用信息熵表示:

$$H = - \sum_{i=1}^m U_i \ln U_i \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^m U_i = 1, U_i \geq 0, I = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

很显然应该使得初始评价参数和评价标准之间的广义距离最小和系统熵最大, 因此构造复合目标函数:

$$\min \sum_{i=1}^m U_i P + \frac{1}{B} \max \left(- \sum_{i=1}^m U_i \ln U_i \right) \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^m U_i = 1, U_i \geq 0, I = 1, 2, \dots, m \quad (24)$$

于是根据式 (23) 和 (24) 构造拉格郎日函数

$$L(U_i, \lambda) = \min \left[\sum_{i=1}^m U_i P + \frac{1}{B} \sum_{i=1}^m U_i \ln U_i \right] - \lambda \left(\sum_{i=1}^m U_i - 1 \right) \quad (25)$$

其中, 正参数 B 用来平衡两个目标, 可根据实际具体情况预先给定, λ 为拉格郎日乘数。分别对上式的变量 U_i 和拉格郎日乘数求 λ 偏导数, 且令其为 0, 得:

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} - \left(\sum_{i=1}^m U_i - 1 \right) = 0 \quad (26)$$

$$\frac{\partial L}{\partial U_i} = P_i + \frac{1}{B} (\ln U_i + 1) - \lambda = 0 \quad (27)$$

由式 (27) 得:

$$U_i = \exp(-B \cdot P_i + B\lambda - 1) \quad (28)$$

由式 (28) 代入式 (26) 得:

$$\exp[-(1 - B\lambda)] = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \exp(-B \cdot P_i)} \quad (29)$$

将式 (29) 代入式 (28) 得:

$$U_i = \frac{\exp(-B \cdot P_i)}{\sum_{i=1}^m \exp(-B \cdot P_i)} \quad (30)$$

式 (30) 即为基于熵极大原理的灰色关联分析评价模型, 将待评价样本归入 U_i 为最小所对应的级别。

2 实际应用

2.1 杏河长 6 油层含油面积评价参数及其标准

杏河油田位于陕甘宁盆地的陕北斜坡东部, 为一平缓的西倾单斜构造 (倾角仅半度左右), 断层和褶皱不发育, 储层具有低孔隙度、低渗透率、油层薄、非均质性强等特点, 属典型的低渗透岩性油藏。该区长 6 油层主要为三角洲前缘相沉积, 发育水下分流河道、河口砂坝、远砂坝、前缘席状砂和分流间湾微相。其中, 尤以三角洲前缘水下分流河道和河口坝为主要储集相带。储层物性差, 渗透率一般为 $(0.1 \sim 3.0) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 孔隙以原生粒间孔为主, 次生孔隙也比较发育, 结构以小孔细微喉型为主。为了提高杏河整体开发效益, 根据该区储量、开发落实程度及沉积、岩相分析, 结合油层厚度、岩心分析、油层物性和试油产量, 分析了杏河长 6 储层含油面积评价的参数和指标, 分类及其指标列于表 1 中。其中一类为控制储量近期可开发面积, 二类为进一步评价后可开发面积, 三类为预测储量远景规划面积。

2.2 效果评价

采用此标准和权值对杏河67口井的数据进行了评价,现将7口典型井的初始评价数据列于表2。

利用本文前面所建立的灰色系统熵模型和灰色关联分析方法两种计算方法并采用表1的标准数据分别对杏河67口井初始评价数据计算,典型井的两种计算方法最终计算结果列于表3和表4。

杏河长6储层砂体厚度6~27m,成岩储集相处于一类有利相带内,油层厚度4~20m,孔隙度12.5%~15%,渗透率(1.5~5.0) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,岩心主要有油浸、油斑显示,试油在西南

部井位有较高油气产能,灰色系统综合评价为1~2类近期可开发(部分为预测储量远景规划)油气面积。两种方法评价结果基本一致,但从整体评价结果来看,灰色熵模型评价结果的分辨率明显高于灰色关联分析方法,使评价结果更为可靠。但也有两种方法的评价效果均不理想的情况,如灰色关联分析计算S127井灰色关联度分别为0.2782、0.3608和0.3610,后两者十分接近,判别其属于三类油藏实属勉强,灰色熵模型计算结果也未完全避免这一不足,究其原因,S127井复杂的地质环境使得对其精确判断有难度。

表1 杏河长6储层含油面积评价参数及权系数

Table 1 Evaluation parameters and weight coefficient of the oil-bearing area in the Chang 6 reservoir, Xinghe oilfield

评价参数	类别	储量分类评价标准			权值
		一类	二类	三类	
砂体厚度/m	标准	25.00	20.00	14.00	1.1
	权系数	0.30	0.35	0.35	
油层厚度/m	标准	15.00	10.00	6.00	1.2
	权系数	0.34	0.33	0.33	
孔隙度/%	标准	14.00	12.50	11.50	1.3
	权系数	0.36	0.32	0.32	
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	标准	3.00	2.00	1.00	0.9
	权系数	0.32	0.34	0.34	
含油饱和度/%	标准	65.00	55.00	45.00	0.9
	权系数	0.32	0.34	0.34	
试油/ $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$	标准	18.00	11.00	5.00	1.7
	权系数	0.33	0.33	0.33	
岩心油气显示	标准	1.00	2.00	3.00	0.9
	权系数	0.63	0.18	0.18	

表2 杏河长6含油面积评价数据

Table 2 Evaluation data of the oil-bearing area in the Chang 6 reservoir, Xinghe oilfield

井号	S126	S127	S121	ZJ84	S173	S167	S158
砂体厚度/m	19.8	12.6	13.6	6.1	26.7	7.5	21.3
油层厚度/m	19.8	3.6	13.6	6.1	11	6.5	15.3
孔隙度/%	12.9	12.7	14.5	15	13.3	13.9	12.2
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	1.3	2.1	3.7	2.3	4.9	3.4	4.9
含油饱和度/%	35.7	54.57	74.53	59.17	51.68	53.24	53.02
试油/ $\text{t}\cdot\text{d}^{-1}$	26.8	2.1	27.1	4.5	39.6	8.7	51.5
岩心油气显示	含油	有显示	含油	有显示	有显示	有显示	有显示

表3 灰色关联分析计算结果

Table 3 Calculation with gray association-ratio analysis

井号	S126	S127	S121	ZJ84	S173	S167	S158
一类油藏	0.3535	0.2782	0.3921	0.2827	0.3430	0.2948	0.3456
二类油藏	0.3404	0.3608	0.3181	0.3455	0.3644	0.3668	0.3532
三类油藏	0.3061	0.3610	0.2898	0.3718	0.2926	0.3383	0.3012
判别结果	一类	三类	一类	三类	二类	二类	二类

表4 熵模型计算结果

Table 4 Calculation with the entropy model

井号	S126	S127	S121	ZJ84	S173	S167	S158
一类油藏	0.2087	0.7292	0.0807	0.6922	0.2297	0.5926	0.2262
二类油藏	0.2691	0.1386	0.3372	0.1938	0.1508	0.1495	0.1924
三类油藏	0.5222	0.1323	0.5821	0.1140	0.6195	0.2579	0.5814
分类级别	一类	三类	一类	三类	二类	二类	二类

3 结束语

本文提出的基于熵极大原理的灰色评价模型,通过构造目标函数,运用求极值的方法建立的灰色熵模型,具有物理概念清晰、数学推导严谨、科学合理、计算简便实用、可信度高等特点,克服了灰色关联分析分辨率低的缺点。引用信息熵理论,将熵函数引入目标函数,从相反对角度“差异性”考虑问题,消除了随机性的影响,使信息的利用率和结果的可靠性均有较大提高,因此可以在地质评价中推广应用。

参 考 文 献

- [1] 宋子齐, 谢向阳, 王浩, 等. 灰色系统储盖组合精细评价的分析方法[J]. 石油学报, 2002, 23 (4): 37~41.
- [2] 宋子齐, 谭成仔, 曲政. 利用灰色理论精细评价油气储层的方法 [J]. 石油学报, 1996, 17 (1): 25~31.
- [3] 邓聚龙. 灰色系统理论教程 [M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990.
- [4] 邓聚龙. 灰预测与灰决策 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [5] Deng Julong. The foundation of gray system theory. Journal of Gray System, 1997 (1): 40.
- [6] Zhou CS, Deng J L. The stability of gray linear systems. Int. J. Control, 1986 (1): 313~320.
- [7] Hearn CJ, Ebanks WJ Jr, Tye RS, Raganathan V. Geological factors influencing reservoir performance of the Hartzog Draw Field, Wyoming [J]. J. Petrol. Thch. 1984, 36.

ENTROPY MODEL OF GRAY SYSTEMS AND ITS APPLICATION IN OIL-BEARING AREA EVALUATION

HUANG Shi-yan

(SINOPEC, Beijing 100029)

Abstract: The resolution of evaluation results is sometimes low when using the present gray association analysis to evaluate the geological models of lithology, physical properties, oil potential and oil-bearing area. In regard to this problem, a new gray fine evaluation model has been constructed using the Lagrange multiplier method on the basis of the Jaynes maximum information entropy principle and definition of gray association in the information theory and structural target function. A case study is given to explain how to use this model. A comparison of this new evaluation model with the original gray association analysis shows that their results are in the main consistent and the resolution is markedly raised. This model is strictly derived and has higher sensitivity and reliability.

Key words: oil-bearing area; entropy, coefficient of correlation; evaluation

(上接第 95 页)

SEDIMENTARY MICROFACIES AND HETEROGENEITY IN FAULT BLOCK RESERVOIR SHU266, SHUGUANG OILFIELD, BOHAI GULF BASIN

CHEN Zhan-kun¹, YU Xing-he², LI Sheng-li²

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 100029, China;

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The Dujiatai pay zone of the Shu266 fault block reservoir consists of fan-delta front deposits, which may be divided into seven microfacies: subaqueous distributary channel, subaqueous interdistributary embayment, mouth-bar, distal-bar, front sheet sand and prodelta mud, of which subaqueous distributary channel sands are the main genetic type of reservoir in the area. In a plan view, the Dujiatai pay zone is highly heterogeneous, while the inter-reservoir and within-reservoir heterogeneities are moderate-high. Microscopically, it is characterized by high coordination numbers and thin throats. The reservoir heterogeneity in the area is mainly controlled by the sedimentary environment.

Key words: Bohai Gulf basin; Shuguang oil field; Shu266 block; Dujiatai pay zone; sedimentary microfacies; reservoir heterogeneity