

综合运用模式识别方法评价 塔北雅克拉地区圈闭的含油气性

刘天佑* 师学明 侯连喜 袁洪克

(中国地质大学, 武汉)

摘 要

刘天佑, 师学明, 侯连喜, 袁洪克. 综合运用模式识别方法评价塔北雅克拉地区圈闭的含油气性. 石油地球物理勘探, 1997, 32(4): 556~564

本文采用灰色关联度、模糊聚类及人工神经网络方法, 预测了塔北雅克拉地区圈闭的含油气性, 预测所用参数有氧化还原电位、放射性能谱、地震、高精度重磁、频谱激电等。为了把灰色关联度方法用于面积性资料处理, 将灰色曲线关联度推广为灰色曲面关联度。在分析对比上述三种预测方法的应用前提、条件及效果的基础上可以看出, 综合运用多种方法、多参数可以减少预测结果的多解性。本文中综合预测的地质效果明显, 其中大涝坝远景区已见工业油气流, 托库远景区有待验证。

主题词 灰色系统 模糊聚类 人工神经网络 模式识别 油气田预测

ABSTRACT

Liu Tianyou, Shi Xueming, Hou Lianxi and Yuan Hongke. Evaluating the hydrocarbon-bearing characteristics of geologic traps in Yakela area in northern Tarim Basin by comprehensive pattern recognition technique. OGP, 1997, 32(4): 556~564

Hydrocarbon-bearing characteristics of geologic traps in Yakela area in northern Tarim Basin were predicted by comprehensively using gray relational grade, fuzzy clustering and neural network methods. The prediction uses many parameters in oxidation-reducing potential, radioactive energy spectrum, seism, gravity-magnetic survey in high accuracy, frequency spectrum induced-polarization, etc. Curvilinear gray relational grade can be extended to gray relational grade of curved surface so as to cope with areal data processing. Having analysed the application prerequisites, conditions and effects of above three prediction methods, we can see that the comprehensive application of some prediction methods and multiparameters may reduce the multiple solution of hydrocarbon prediction. This comprehensive prediction technique has brought obvious geologic effect. For instance, industrial oil and gas flows have been seen in Dalaoaba area, and only a check is needed in Tuoku area.

* Liu Tianyou, Department of Geophysical Exploration, China Geology University, Wuhan City, Hubei Province, 430074
本文于1996年9月19日收到, 修改稿于同年11月24日收到。

Subject heading: gray system, fuzzy clustering, neural network, pattern recognition, hydrocarbon prediction

引言

塔里木盆地经历了近 40 年的油气勘探,取得了十分丰硕的成果。1984 年,塔里木盆地北部雅克拉构造的沙参 2 井喷出了高产油气流,其储层为海相奥陶系碳酸盐岩。90 年代初,在塔北地区开展了综合物化探方法评价圈闭的技术研究,在雅克拉托库构造研究区内开展了三维地震勘探、高精度重磁、土壤微磁、频谱激电、氧化还原电位、放射性(地面 γ 能谱、热释光、活性炭吸附氧)等多方法、多参数的野外工作,获得了评价圈闭含油气性的大量信息。

圈闭含油气性评价的特点之一是它的综合性和不确定性。圈闭含油气性评价的传统作法是通过目视对比,凭借解释人员的经验进行分区分类给出地质判断。在多维信息情况下,采用目视对比、综合分析的方法显然不能满足复杂地质背景下油气预测的要求。

模式识别是本世纪 50 年代发展起来的一门新兴学科,它广泛应用于国民经济的各个领域,60 年代以来,苏美学者把模式识别方法引用到地学领域,现在已广泛用于卫星遥感图象处理、矿产预测、物化探处理等各个方面,并且获得良好的效果。

模式识别方法按其原理可以分为四种:①统计模式识别,其理论成熟,且要求所解决的问题符合统计规律,如贝叶斯方法、费歇尔方法;②模糊模式识别,它建立在模糊数学理论基础之上,用于解决具有模糊性的问题;③灰色系统方法,它用于解决介于统计模式识别和模糊模式识别之间的问题,如灰色关联度分析、灰色聚类;④人工神经网络方法,它采用类似于人脑神经元生理过程的模型,能有效地解决以往模式识别不能解决的一些问题。

以上每一种方法都有自己的理论基础和应用前提,若应用不当,就有可能走入误区,甚至导致分类和预测结果的错误,如费歇尔方法虽然简单易行,但是只适于解决线性可分的地质问题。因此,本文的意图在于对同一个研究区用多种方法进行分类识别和对比,从中获取切合实际的预测结果。

灰色关联度方法^{[1]~[3]}

1982 年,邓聚龙提出灰色系统理论。它是一种新型的系统分析理论,在社会、经济、农业、气象、生态、环境、水利、工程、管理等多个领域得到应用。所谓灰色是指系统内部结构、参数、特征等信息具有不完全或不确知的。矿产资源系统是广阔空间、漫长时间、复杂介质中发生和发展的多种地质作用的产物,具有随机性的动态变化,可以视为灰色系统,用灰色系统理论解决。

在地质工作中,对系统分析的量化方法大都采用数理统计方法,如回归分析等,它要求大量的采样数据以满足概率统计要求,同时要求数据分布典型,符合统计规律等等。灰色系统理论采用关联度分析方法来实现对数据关联性的研究。关联度是对两个系统或系统中两个因素之间随时间(或空间)而变化的关联性大小的度量。若变化态势基本一致,则关联度较大,反之两者的关联度就小。关联度分析不需要大样本量,也不要求数据符合典型的分布规律。在矿产资源系统中,数据的分布不可能符合典型的分布规律,在整体上是杂乱的,因而宜用关联度分

析方法。邓聚龙根据社会、经济、农业等方面的问题定义了曲线关联度,其实质是对几何曲线间几何形状的比较分析,即确定好参考点后,认为曲线几何形状越接近关联度越大,因而可将曲线间差值的大小作为关联度的度量。在油气勘探中,我们采集的数据是分布在一个二维的平面上,因此不宜用曲线关联度的分析方法,即不宜用一段测线作为灰色子波逐线进行关联度扫描来提取与灰色子波相关联的油气信息,而必须采用二维窗口作为灰色子波,因此,我们根据关联度的实质,参照曲线关联度定义方法,把曲线关联度推广为曲面关联度。

我们定义下式为 x_i 对 x_0 的关联系数

$$\epsilon_i(k, l) = \frac{\min_i \min_k \min_l |x_0(k, l) - x_i(k, l)| + \rho \max_i \max_k \max_l |x_0(k, l) - x_i(k, l)|}{|x_0(k, l) - x_i(k, l)| + \rho \max_i \max_k \max_l |x_0(k, l) - x_i(k, l)|} \quad (1)$$

式中曲面数组 $\{x_0(k, l)\} (k=1, 2, \dots, K; l=1, 2, \dots, L)$ 即为我们选定的灰色子波,也称为母序列或参考序列。若我们选定窗口大小为 3 条线,每条线为 5 个点,则 $K=3, L=5$ 。

曲面数组 $\{x_i(k, l)\} (i=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, K; l=1, 2, \dots, L)$ 即为比较子波或子序列或比较序列。 M 是母序列滑动的次数,它与测区的点线数有关。若测区有 m 条线,每条线有 n 个测点,以窗口 $K=3, L=5$ 为例,则 $M=(m-2)(n-4)$,它类似于重力的滑动平均法。

式(1)中: $|x_0(k, l) - x_i(k, l)|$ 为 x_0 中第 (k, l) 点与 x_i 中对应点差值的绝对值; $\min_i \min_k \min_l |x_0(k, l) - x_i(k, l)|$ 为对 (k, l) 和 i 求两级最小差; $\max_i \max_k \max_l |x_0(k, l) - x_i(k, l)|$ 为对 (k, l) 和 i 求两级最大差; ρ 为分辨系数, ρ 的大小可以反映分辨效果,通常取值为 0.1~0.8。不难知道,参考序列窗口每滑动一次,就计算 KL 个关联系数 $\epsilon_i(k, l)$,这样信息过于分散。若把关联系数集中为一个值,并把这个值赋给与之对应的比较序列窗口的中心点

$$r_i = \frac{1}{KL} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \epsilon_i(k, l) \quad (2)$$

则我们称 r_i 为曲面 x_i 的第 i 个滑动面与 x_0 的关联度。若测区内只有一个观测参数,如氧化还原电位 ET,则母序列 x_0 也只有一个,根据上面的结果我们就可以作出单个参数的关联度平面等值线图。

若测区内有 N 个观测参数,则母序列 x_0 也有 N 个,按上述方法求得 N 个关联度,把它们进行线性组合

$$R = \sum_{i=1}^N \alpha_i r_i \quad (3)$$

式中: α_i 为 r_i 的权系数; R 称为综合关联度。绘出综合关联度等值线图,综合关联度值越大,表明与母序列越相似。母序列是我们根据已知油气井分布选定的,因而表明含油气的可能性越大。

沙 4 井位于测区西南部 5 线 25 点,是区内唯一已知井,该井在 5390.6m 深的侏罗系地层获得 40.6m 厚的油气层,在 5482m 深的震旦系地层中获 58m 厚的油气层。我们以见油气的沙 4 井为已知样本,并以该井为中心的 3×5 窗口的数据建立母序列,取 $\rho=0.5$,以氧化还原电位 ET 和放射性元素 U、Rn、K、Tc、Th 五种元素的能谱作为参数,得到结果如图 1 所示。

图 1 中综合关联度值大于 0.8 的有 3 个大封闭圈,其中测区的南部①号远景区对应着已知油井——沙 4 井,②、③号远景区对应着托库 1、2 号构造。从 T_5^0 深度图(图 2)可以看出,托库 1、2 号构造是前中生代风化侵蚀面的断块局部隆起部分,应是油气富集的有力部位。图 1 中的④、⑤号远景区对应着测区北部的大涝坝构造,也是断块的局部隆起,也应是油气富集的有

利部位。该区经钻探证实含有工业油气流,它已成为雅哈油田的一部分。由此可见,根据综合关联度圈定油气远景区有一定的地质效果。

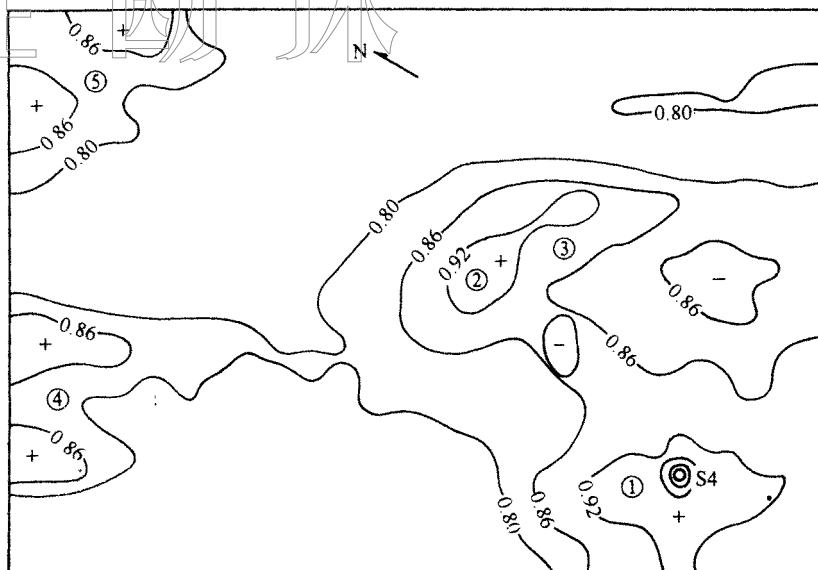


图 1 塔北雅克拉地区灰色关联度方法处理结果

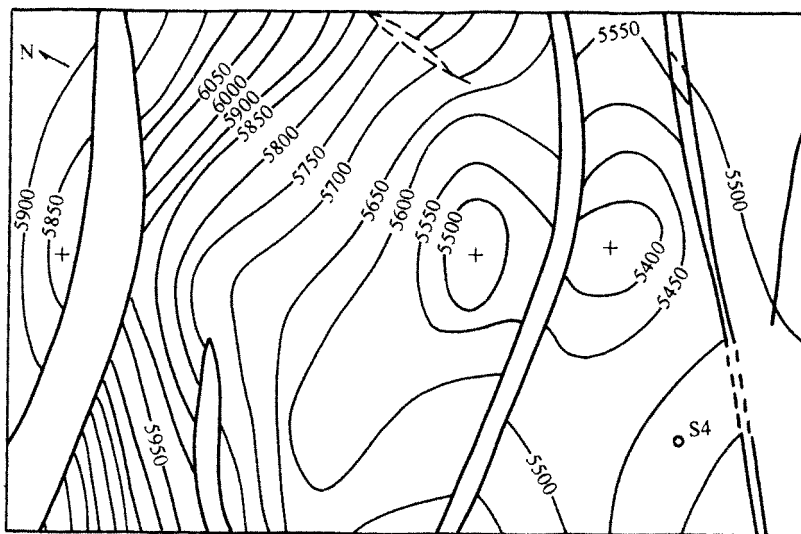


图 2 塔北雅克拉地区地震 T_s^0 构造图

在灰色关联度方法的应用中我们发现:

(1) 根据最终获得的综合关联度等值线图虽然大致预测出沙 4 井、托库 1 号和 2 号构造、大涝坝构造油气远景区,但远景区①、②、③号连为一片,其南侧等值线未封闭,曲线形态也过于简单,反映不出更多的细节。

(2) 灰色子波的大小不易确定,取不同的窗口如 3×9 , 3×5 , 3×7 , 1×3 所得的结果差别较大,有的结果甚至误判。

(3) 不同参数得出的关联度异常不一样,用式(3)计算综合关联度时,权系数 α_i 对结果有

较大的影响,而 α_i 只能凭经验确定,如在本例(图1结果)中,我们取氧化还原电位ET的 α 值为0.5,U、Rn、K、Tc、Th元素的 α 值为0.1。

模糊聚类方法^{[4]~[7]}

模糊数学是1965年L. 柴德提出的,在自动化控制、信息处理、人工智能、经济学、社会学等方面有广泛的应用。模糊聚类是一种无监督学习的识别方法,主要依据数据的内部结构进行模糊分类。模糊聚类又分为模糊聚类K均值法和模糊聚类协方差方法,我们以模糊聚类K均值法为例说明其聚类的原理。

假定已知样品集为 $\Omega = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$,每个样品取 n 个特征,首先确定要分成的类数,也就是凝聚点的个数。由于类数和凝聚点的位置是人为给定的,因此必须在聚类过程中对聚类中心的位置不断调整,最后得出合理的分类。这种方法就是传统聚类算法中的聚类K均值法。模糊聚类K均值法由上述方法派生而来,它用模糊数学中隶属度的概念代替聚类K均值法中距离的概念,用样品对某一聚类中心的隶属程度来衡量该样品从属某一类的程度,同样要经过反复的迭代才能求出相应的聚类中心。其基本步骤如下^[4]:

(1)确定聚类的类数 $K, 1 < K < N$,如把样品集分为含油和不含油两类,则 $K=2$ 。

(2)给出初始隶属度矩阵 $U^{(0)} = (u_{ij}^{(0)})$,一般的模糊聚类K均值法是根据经验来设定每一点对各类的隶属度,例如第 j 点我们认为含油的可能性大,则可以把它归为 W_1 类(不含油的归为 W_2 类),如使 $U_{1j}=0.9, U_{2j}=0.1$ 或 $U_{1j}=0.8, U_{2j}=0.2$ 等等,注意到这里的每列元素之和等于1。显然凭经验来确定 $U^{(0)}$ 并不容易,我们这里借鉴于诱导聚类K均值法来生成初始隶属度矩阵。

(3)利用下式求各类的聚类中心 $V_i^{(l)}$

$$V_i^{(l)} = \frac{\sum_{j=1}^N (u_{ij}^{(l)})^m x_j}{\sum_{j=1}^N (u_{ij}^{(l)})^m} \quad i = 1, 2, \dots, K \quad (4)$$

(4)由于聚类中心在计算中需要不断调整,因此每得到一个新的聚类中心就必须重新计算新的隶属度矩阵,计算新的隶属度矩阵 $U^{(l+1)}$ 表达式为

$$u_{ij}^{(l+1)} = 1 / \sum_{p=1}^K \left(\frac{d_{ij}}{d_{pj}} \right)^{2/(m-1)} \quad i = 1, 2, \dots, K; j = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中: d_{ij} 表示 x_i 与 x_j 的距离, d_{pj} 为 x_p 与 x_j 的距离; m 是权指数,通常取 $m=2$ 。

(5)重复步骤(3)、(4),直到收敛为止。结束迭代的标准可以取 $\max_{ij} \{|u_{ij}^{(l+1)} - u_{ij}^{(l)}|\} \leq \varepsilon$ 。

初始隶属度矩阵是采用诱导的方法来产生的^[4]:

(1)确定类数 $K, 1 < K < N$ 。

(2)输入初始分类矩阵 $U^{*(0)} = (u_{ij}^{*(0)})$, $i=1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, N$ 。此处的 $U^{*(0)}$ 是使用者根据自己意愿简单划定的初始分类矩阵,通常把 $u_{ij}^{*(0)}$ 取为0或1,例如定为不含油取0,含油取1,每列中必须有一个且仅有一个元素取1,然后通过计算对此矩阵进行调整。

(3) 诱导产生隶属度矩阵 $U^{(0)} = (u_{ij}^{(0)})$, 并有

$$u_{ij}^{(0)} = \frac{N_i - \beta \sum_{i=1}^N u_{ij}^{* (0)} d_{ij}}{N - \beta \sum_{i=1}^N d_{ij}} \quad (6)$$

把求得的 $U^{(0)}$ 做为初始隶属度矩阵 U , 其中 $u_{ij}^{* (0)}$ 是 x_j 对第 j 类的隶属度, N 是总点数, N_i 是“硬”分类中 W_i 类的点数(所谓“硬”分类是按常规方法分类的), d_{ij} 是 x_i 与 x_j 的距离, β 是一个参数, 其作用是保证 $u_{ij}^{(0)}$ 的值位于 0~1 之间, 通常取作 $\max_{ij} d_{ij}$ 的某个倍数。

对于上述托库构造, 我们用氧化还原电位 ET 和放射性能谱 U、Rn、K、Tc、Th 元素进行模糊 K 均值法聚类, 结果如图 3 所示(模糊协方差聚类结果类似, 在此不列出)。对比灰色关联度分析结果和模糊聚类 K 均值法的结果有一定相似性, 测区西南部的①号远景区对应大涝坝构造。不同之处是测区中部还有另外两个, 编号为⑥和⑦。

对比 T_5^0 构造图(图 2), ⑥和⑦号聚类中心对应的位置是托库构造高隆起与大涝坝构造高隆起之间的低凹位置。从石油地质条件分析, 它是不利的, 因此不能单凭一种预测方法得出的结论来划定远景区。

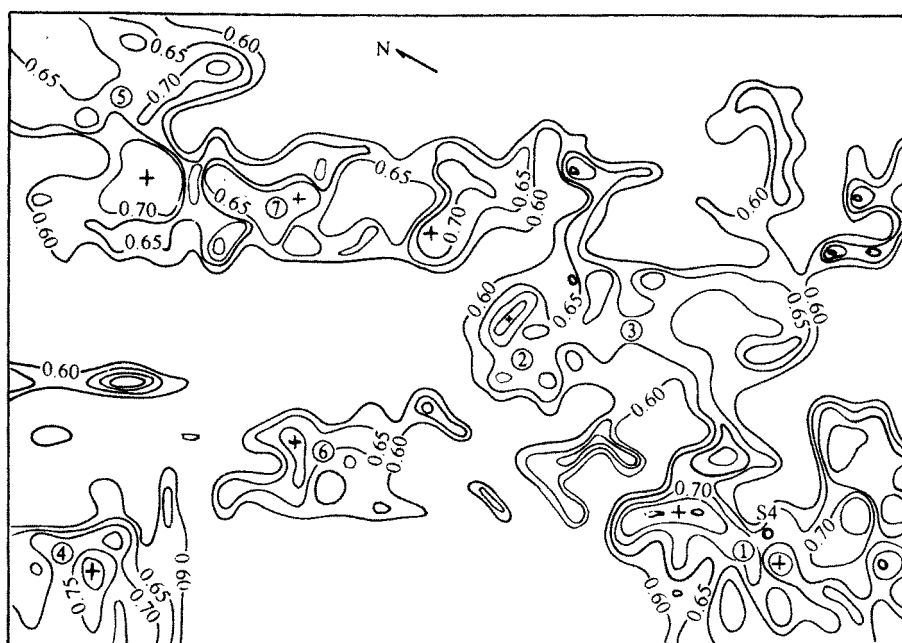


图 3 塔北雅克拉地区模糊聚类方法结果

在模糊聚类方法的应用中我们发现: ①该方法是无监督学习的聚类方法, 使用简单, 它不必预先选择已知见油与未见油样本, 并且选择什么参数聚类也可以反复试验和对比; ②聚类效果与灰色关联度方法相当, 它也能得出对远景区①、②、③、④、⑤号的正确判断, 而对于远景区⑥、⑦号从石油地质条件分析应该说是误判, 其原因是某些预测参数(如 U、Th、Rn、Tc 元素)反映含油气性的特征并不明显, 用它们作为预测参数, 反而成为干扰因素, 而该聚类方法抗干扰能力并不强。

人工神经网络方法^{[10]~[12]}

人工神经网络是由大量的类似人脑神经元的简单处理单元广泛地相互联接而成的复杂的网络系统。理论与实践表明,在信息处理方面,神经网络方法比传统模式识别方法更具有优势。人工神经元是神经网络的基本处理单元,其接收的信息为 x_1, x_2, \dots, x_n , 而 w_{ij} 表示第 i 个神经元到第 j 个神经元的连接强度或称权重。神经元的输入是接收信息 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 与权重 $W = \{w_{ij}\}$ 的点积,将输入与设定的某一阈值作比较,再经过某种形式的神经元激活函数 f 的作用,便得到该神经元的输出 O_i 。常见的激活函数为 Sigmoid 型。人工神经元的输入与输出的关系为

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta\right) \quad (7)$$

式中: x_i 为第 i 个输入元素,即 n 维输入矢量 X 的第 i 个分量; w_i 为第 i 个输入与处理单元间的互联权重; θ 为处理单元的内部阈值; y 为处理单元的输出。

常用的人工神经网络是 BP 网络,它由输入层、隐含层和输出层三部分组成。BP 算法是一种有监督的模式识别方法,包括学习和识别两部分,其中学习过程又可分为正向传播和反向传播两部分。正向传播开始时,对所有的连接权值置随机数作为初值,选取模式集的任一模式作为输入,转向隐含层处理,并在输出层得到该模式对应的输出值。每一层神经元状态只影响下一层神经元状态。此时,输出值一般与期望值存在较大的误差,需要通过误差反向传递过程,计算模式的各层神经元权值的变化量 $\Delta w_{ij}^{(p)}$ 。这个过程不断重复,直至完成对该模式集所有模式的计算,产生这一轮训练值的变化量 Δw_{ij} ,在修正网络中各种神经元的权值后,网络重新按照正向传播方式得到输出。实际输出值与期望值之间的误差可以导致新一轮的权值修正。正向传播与反向传播过程循环往复,直到网络收敛,得到收敛后的互联权值和阈值。

BP 算法的计算步骤可归纳为:

(1) 初始化连接权值和阈值为一小的随机值,即 $W(0) = \text{任意值}$, $\theta(0) = \text{任意值}$ 。

(2) 输入一个样本 X 。

(3) 正向传播,计算实际输出,即根据输入样本值、互联权值和阈值,计算样本的实际输出,其中输入层的输出等于输入样本值,隐含层和输出层的输入为

$$\text{net}_j = \sum w_{ji} O_i \quad (8)$$

输出为

$$O_j = f(\text{net}_j) \quad (9)$$

其中 f 为阈值逻辑函数,一般取 Sigmoid 函数,即

$$O_j = 1 / \left(1 + \exp \left(- \frac{\text{net}_j + \theta_j}{\theta_0} \right) \right) \quad (10)$$

式中: θ_j 表示阈值或偏置; θ_0 的作用是调节 Sigmoid 函数的形状,较小的 θ_0 将使 Sigmoid 函数逼近于阈值逻辑单元的特征,较大的 θ_0 将导致 Sigmoid 函数变平缓,一般取 $\theta_0 = 1$ 。

(4) 计算实际输出与理想输出的误差

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_k (t_{pk} - O_{pk})^2 \quad (11)$$

式中: t_{pk} 为理想输出; O_{pk} 为实际输出; p 为样本号; k 为输出节点号。

(5) 误差反向传播, 修改权值

$$\Delta w_{ji}^{(p)} = \eta \delta_{pj} O_{pi}$$

式中

$$\delta_{pk} = (t_{pk} - O_{pk}) O_{pk} (1 - O_{pk}) \quad (\text{输出层}) \quad (12)$$

$$\delta_{pj} = O_{pj} (1 - O_{pj}) \sum_k \delta_{pk} w_{kj} \quad (\text{隐含层}) \quad (13)$$

(6) 判断收敛, 若误差小于给定值, 则结束, 否则转向步骤(2)。

我们仍以沙 4 井作为已知样本, 取氧化还原电位 ET, 放射性元素 Rn、Th、Tc、U、K 和地震反射 T_s^0 构造面等 7 个特征为识别的依据。值得一提的是在 BP 神经网络方法中增加了 T_s^0 构造面这一地质信息。 T_s^0 构造面反映了局部构造的起伏变化, 其局部隆起部位应是油气运移和富集的有利部位, 它可以作为判断含油气性的诸种因素之一。前两种方法未列出采用 T_s^0 构造面参数的结果, 是因为我们仅把 T_s^0 构造面二值化, 用二值化的 T_s^0 构造面作为信息, 灰色关联度和模糊聚类结果均不好。如前面所述, 在该区投入高精度重磁、土壤微磁、频谱激电等多种方法, 一些参数未入选为判别的特征参数, 是因为某些参数是相关的, 如经提取后的剩余异常就与地震 T_s^0 构造面相关, 有些参数如频谱激电则只做了两条剖面, 未覆盖全区, 不便使用。在使用神经网络方法判别之前, 还采用 K-L 变换 (Karhaem-Loeve) 来分析和提取特征, 由于这里主要比较不同聚类方法的效果, 所以, K-L 变换不作赘述。

我们取沙 4 井周围 9 个点即 4~6 线的 23~25 点作为已知油气的训练样本, 由于区内没有未见油的钻井, 只好根据地质资料分析, 选取 14~16 线的 55~57 点作为非油气的训练样本。BP 网络学习迭代 17174 次, 总误差为 0.0001。学习效果相当满意。以学习后的网络进行识别, 得出结果如图 4 所示。

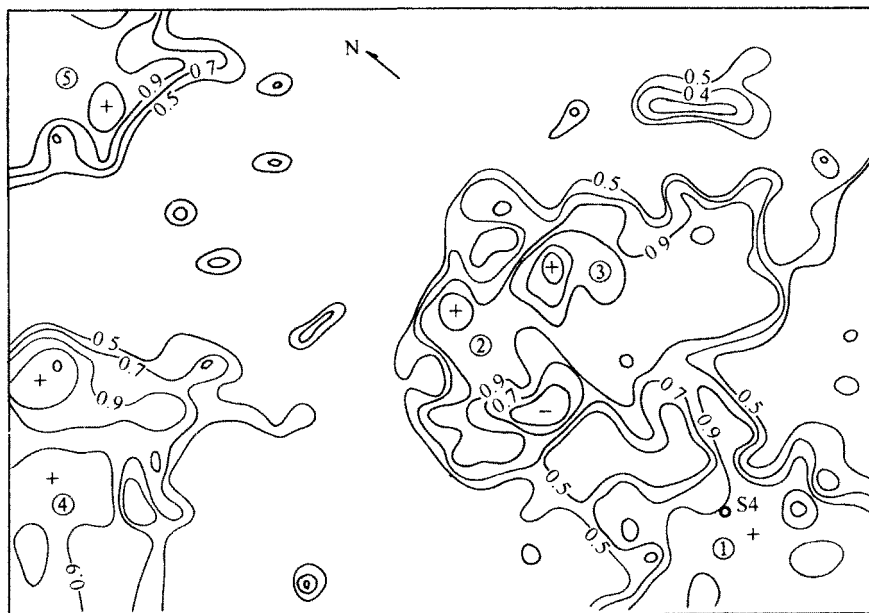


图 4 塔北雅克拉地区 BP 神经网络聚类结果

由图可见,其结果与前述两种方法所得图 1、图 3 很相似,不同之处在于有些细节比前两种方法细致一些。

结 论

(1)根据托库地区的地震、重力、磁力、土壤微磁、频谱激电、氧化还原电位、放射性(地面能谱、热释光、活性炭吸附氡)等多种参数,首先可以采用 K-L 变换方法分析和压缩参数空间(根据实际情况可以不采用),然后采用灰色关联度分析、模糊聚类 K 均值法、模糊聚类协方差法以及人工神经网络方法(有监督的反向传播 BP 算法和无监督的自适应谐振的 ART 算法)对油气远景区进行分类和预测。预测结果为:①号油气远景区即已知见油的沙 4 井及周围地区;②、③号油气远景区位于地震勘探所查明的托库 1、2 号构造,托库 1、2 号构造位于沙雅隆起的东段,其西段即为 1984 年见高产油气流的沙参 2 井,它们都在同一个断隆带上,应是含油气性最好的远景区,从预测结果看,其条件优于北部的④、⑤号远景区;④、⑤号远景区位于大涝坝构造,是雅哈油田的组成部分。

(2)单种方法应用都有一定的效果,其中人工神经网络方法最好,它对复杂因素的抗干扰能力较强,操作使用受人为因素的影响也较少。选择哪些参数、窗口大小、加权系数等因素对计算结果都有较大的影响。在先验信息较少,地质情况复杂的条件下,我们建议用多种方法,尽可能采用多种参数,识别后再综合其结果。否则,预测的结果会流于形式,摆脱不了人为因素的干预和影响。

(3)80 年代,传统模式识别方法和聚类方法曾在固体矿产预测中应用过,近年兴起的人工神经网络方法对解决矿产预测问题有更强的能力,综合运用这些方法是解决矿产预测的一个重要途径。特别是油气勘探,采用多参数综合预测方法来评价含油气性有广泛的前景。

衷心感谢邱绳德、侯卫国高级工程师、徐忠祥教授、孟小红博士提供了宝贵资料和给予的热情帮助。

参 考 文 献

- 1 邓聚龙. 灰色系统基本方法, 华中理工大学出版社, 1992
- 2 付立. 灰色系统理论及其应用, 科学技术文献出版社, 1992
- 3 徐忠祥, 吴国平. 灰色系统理论与矿产灰色预测, 中国地质大学出版社, 1993
- 4 王碧泉等. 模式识别理论、方法和应用, 地震出版社, 1989
- 5 冯德益, 楼世博. 模糊数学方法与应用, 地震出版社, 1983
- 6 吴万铎, 吴万钊. 模糊数学与计算机应用, 电子出版社, 1988
- 7 贺仲雄. 模糊数学及其应用, 天津科学技术出版社, 1983
- 8 边肇祺. 模式识别, 清华大学出版社, 1988
- 9 穆石敏, 申宁华, 孙运生. 区域地球物理数据处理方法及应用, 吉林科技出版社, 1990
- 10 殷勤业, 杨崇凯, 谈正编译. 模式识别与神经网络, 机械工业出版社, 1992
- 11 包·约翰. 神经网络的模式识别方法, 科学出版社, 1992
- 12 杨行峻, 郑君里. 人工神经网络, 高等教育出版社, 1992
- 13 Островский Э Я. Целевой прогноз как принцип рационального комплексирования результатов геоизмерений. Советская Геология, 1986, (11)
- 14 Островский Э Я. Сравнительный анализ результатов геоизмерений. Советская Геология, 1980, (10)
- 15 Никитин А А. Геотетические основы обработки геофизической информации недр, 1986