

# 碳酸盐岩测井-沉积相的模糊判识系统

游章隆 汪徐焱

(成都理工学院, 四川成都 610059)

测井分层和测井参数分布的模糊性, 是川东石炭系黄龙组碳酸盐岩剖面测井-沉积相判识中的困难所在。在引入隶属函数概念的基础上, 根据模糊模式识别和模糊专家决策的机理, 开发出适用于碳酸盐岩剖面测井-沉积相的模糊判识系统。通过对三个井黄龙组沉积微相的判识表明, 系统的平均正确判识率达88.5%, 具有良好的应用前景。

关键词 川东 碳酸盐岩 沉积微相 模糊数学 判识

第一作者简介 游章隆 男 54岁 副教授 石油与天然气地质

针对川东石炭系黄龙组碳酸盐岩剖面的地质特点, 根据模糊数学理论开发的测井-沉积相的模糊判识系统, 在引入隶属函数和隶属度概念的基础上, 通过模糊模式识别和模糊专家决策, 对复杂碳酸盐岩剖面按深度逐点进行了测井-沉积微相的判识、划分和输出井孔沉积微相柱状剖面, 平均正确判识率达88.5%, 具有较好的地质效果。

## 1 碳酸盐岩沉积相的模糊性

任何事物都既有精确性的一面, 又有模糊性的一面, 即有着“非此即彼”的精确性, 又有“亦此亦彼”的模糊性。有些事物或概念有清晰的“集合”边界, 易于进行精确的划分; 有些事物或概念则难以用具体的界限予以精确划分。模糊性现象是地质科学研究中的常见现象, 沉积相即是属于这类模糊的非定量化的概念。

与碎屑岩剖面相比较, 碳酸盐岩剖面的测井-沉积相有更强的模糊性, 各沉积微相“集合”之间无明确的边界, 而具有明显的中介过渡性, 造成测井-沉积相划分上的不确定性。川东石炭系黄龙组碳酸盐岩测井-沉积相判识中的模糊性表现在以下两方面。

### 1.1 测井分层的模糊性

为建立测井相模式, 通常须据测井曲线随井深的变化分层。对黄龙组碳酸盐岩剖面进行测井分层后发现, 划分出的“层”具有两种不确定状态: 一个“层”中包含两种或两种以上的沉积微相段; 一个沉积微相段分属两个相邻的“层”。当地质划分的沉积微相段厚度较小时, 这种模糊性就更显得十分突出。分层的模糊性使得基于经典集合论的测井相模式包含着相互渗透、重叠的沉积环境信息, 从而给测井-沉积相的准确判识带来重大困难。

### 1.2 参数分布的模糊性

毫无疑问, 不同沉积微相测井参数集的分布特征差异越大, 越易通过测井相分析判识。黄

龙组碳酸盐岩剖面的不同微相的测井参数分布相互重叠、穿插, 具有十分显著的模糊性(图 1), 这种模糊性和欲获得沉积微相的精确判识结果之间产生极大矛盾。

实践证明, 模糊数学理论能较好地解决测井-沉积相研究中概念(或集合)的模糊性和结论的精确性之间的矛盾。从模糊集合论的角度观察, 模糊性中包含着精确性, 即“亦此亦彼”的事物中必然存在着“非此即彼”的信息。黄龙组碳酸盐岩剖面测井-沉积相判识中, “非此即彼”的沉积相信息如下:

(1) 不同沉积微相的测井参数分布区间存在差异。由图 1 可见, 测井参数的分布存在着重叠和交叉, 但同时也存在着不重叠的区间。

(2) 不同沉积微相的测井参数分布概率存在差异。图 2 展示了这种概率分布的差异; 在同一测井参数轴上, 不同沉积微相的概率分布不同, 即使在相互重叠的区间, 不同沉积微相的概率分布也不同。

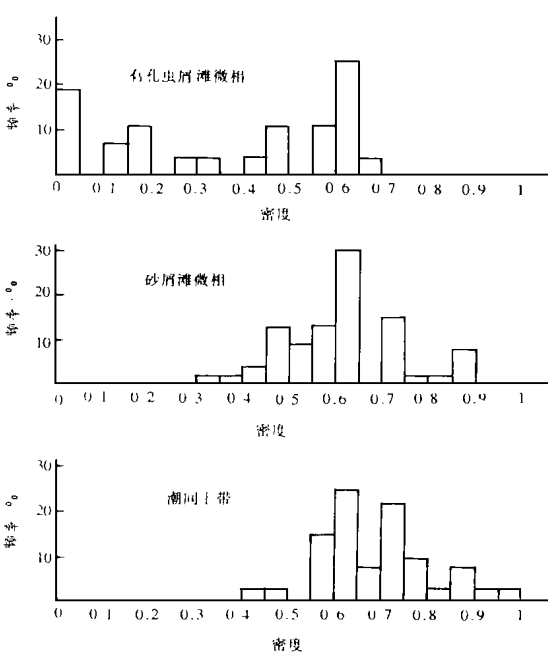


图 2 沉积微相的概率分布差异  
(温泉 1-1 井黄龙组 1 段 2~4 亚段, 参数刻度均为标准化后的相对值)

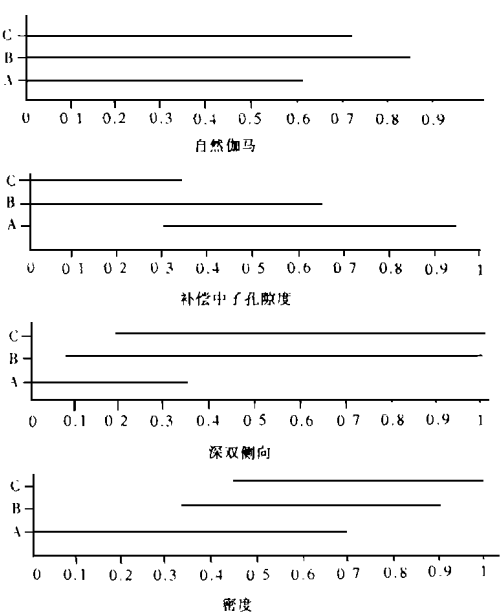


图 1 沉积微相的测井参数分布  
(温泉 1-1 井黄龙组 1 段 2~4 亚段, 参数刻度均为标准化后的相对值)  
A—有孔虫屑滩微相(含鲕滩及介屑滩微相); B—砂屑滩微相; C—潮间上带

显然, 通过适当的方式提取差异中包含的“非此即彼”的沉积相信息, 是复杂碳酸盐岩剖面测井-沉积相判识中的关键所在。

## 2 模糊判识系统原理

针对黄龙组碳酸盐岩剖面测井-沉积相分析中的模糊性, 模糊判识系统引入了模糊模式识别和模糊专家决策机理。

所谓模式识别, 是按某种规则自动判识待判模式与标准模式(类)的相似性, 从而确定待判模式的归属。这些标准模式(类)应各自具有某些性质和特征。而模糊模式识别则是依据模糊数学理论, 引入隶属度或贴近度的概念, 以确定未知模式(类)归属的模式识别方法。

隶属函数是模糊模式识别技术中的核心概念。设  $A$  是论域  $U$  上的一个模糊子集,  $\mu_A$  为论域  $U$  上已给定的映射

$$\mu_A: U \rightarrow [0, 1]$$

则对于任意元素  $x \in U$ , 都确定了一个数  $\mu_A(x)$ 。 $\mu_A$  即为  $A$  的隶属函数, 而  $\mu_A(x)$  则称为元素  $x$  对于  $A$  的隶属度, 表示  $x$  隶属于模糊子集  $A$  的程度。 $\mu_A(x)$  接近于 1, 表示  $x$  隶属于  $A$  的程度大;  $\mu_A(x)$  接近 0, 表示  $x$  隶属  $A$  的程度小<sup>[1]</sup>。

若将模糊子集  $A$  的内容视作由沉积微相测井参数分布决定的“集合”, 则某种沉积微相在各测井参数轴上的所有“集合”及相应的隶属度可构成该微相的测井相模式。显然, 在建立相应的隶属函数之后, 计算样品点属于各沉积微相的隶属度, 便可根据最大隶属度原则判识任意样品点归属的测井-沉积微相。

在模糊模式识别的基础上引入模糊专家决策机理, 可进一步完善对复杂碳酸盐岩剖面测井-沉积相的模糊判识。模糊专家决策将专家的知识 and 经验以知识库的形式存入计算机, 并模仿人类专家解决问题的思维过程和推理方式对研究对象作出判断, 从而可在初始信息不完全或不十分准确的情况下给出尽可能准确的解答。

一个具有模糊专家决策功能的模糊模式识别系统的工作原理如图 3 所示。

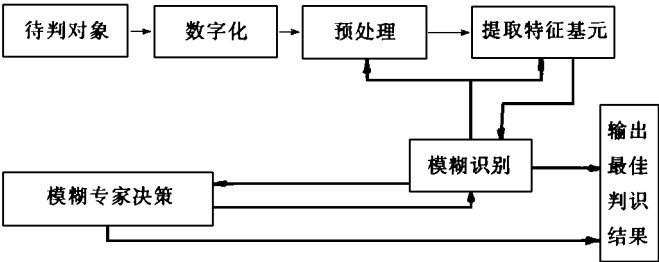


图 3 模糊判识系统工作原理图

3 模糊判识过程

按照上述原理编制的计算机程序, 实现了对黄龙组碳酸盐岩测井-沉积相的逐点模糊判识, 具体判识步骤为:

(1) 按深度逐点输入原始测井数据。此次研究中, 按 0.4 m 的深度间距输入 4 个测井参数(自然伽马、补偿中子孔隙度、密度及深双侧向)的原始测量值  $x'_{ij}(i = 1 \sim n, j = 1 \sim m)$ ,  $n$  为样品点数,  $m$  为变量数。

(2) 对原始测井数据进行极差正规化<sup>[2]</sup>变换, 公式为

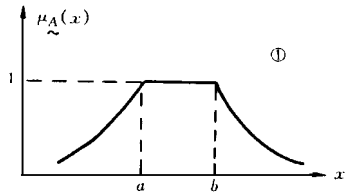
$$x_{ij} = \frac{x'_{ij} - x'_{\min}}{x'_{\max} - x'_{\min}}$$

式中  $i$  为样品点序号;  $j$  为变量序号;  $x'_{\min}$  和  $x'_{\max}$  分别为测井参数的最小和最大原始测量值;  $x_{ij}$  为标准化后的相对值。

(3) 建立模糊模式识别的数学模型, 即确定沉积微相各测井参数的隶属函数的数学表达式。根据研究井段各微相的测井参数分布区间特征和概率分布特征, 采用以下两类隶属函数, 经适当调整隶属函数参数  $a, b, K$  的值, 便可得到隶属函数  $\mu_A$  的具体数学表达式

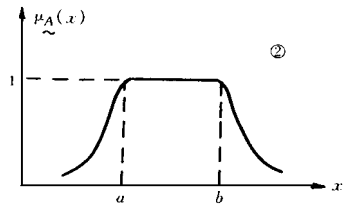
隶属函数 I (图 4-①):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{1}{1 + K(x-a)^2} & (x < a) \\ \dots & (a \leq x \leq b) \\ \frac{1}{1 + K(x-b)^2} & (x > b) \end{cases}$$



隶属函数 II (图 4-②):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} e^{-K(x-a)^2} & (x < a) \\ \dots & (a \leq x \leq b) \\ e^{-K(x-b)^2} & (x > b) \end{cases}$$



式中  $a, b$  为测井参数取值区间界线值;  $e$  为自然对数底;  $K$  为降半柯西分布和降半正态分布的待定系数。

在确定隶属函数表达式之后, 即可计算任意深度的样品点在各测井参数上属于各沉积微相的隶属度。

图 4 隶属函数曲线

(4) 按最大隶属度原则初步判识样品点归属的测井-沉积相模式(类)和归属各模式(类)的顺序。

最大隶属度原则指出, 若  $A_1, A_2, \dots, A_L$  是论域  $U$  上的  $L$  个模糊子集, 其隶属函数分别是  $\mu_{A_1}, \mu_{A_2}, \dots, \mu_{A_L}$ , 则给定任意元素  $x_0 \in U$ , 应优先将  $x_0$  划归使  $\mu_{A_i}(x_0) = \max_{1 \leq j \leq L} \mu_{A_j}(x_0)$  成立的模糊子集  $A_i$  中<sup>[1]</sup>。式中  $i$  为隶属函数序号,  $j$  为模糊子集序号。

设有  $L$  个模式(类),  $m$  个变量, 根据已建立的隶属函数表达式, 计算出第  $i$  个样品点的隶属度组成的矩阵  $R_i$ 。依据此矩阵, 可进一步计算出该样品点属于各模式(类)的隶属度。按上述最大隶属度原则, 应将第  $i$  个样品点判归使其隶属度最大的测井-沉积微相。

矩阵  $R_i$  可表述为

$$R_i = \begin{cases} \mu_{A_{11}}(x_{i1}) & \mu_{A_{12}}(x_{i2}) & \dots \mu_{A_{1m}}(x_{im}) \\ \mu_{A_{21}}(x_{i1}) & \mu_{A_{22}}(x_{i2}) & \dots \mu_{A_{2m}}(x_{im}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \mu_{A_{L1}}(x_{i1}) & \mu_{A_{L2}}(x_{i2}) & \dots \mu_{A_{Lm}}(x_{im}) \end{cases}$$

(5) 建立模糊数据库和专家知识库。即将初步判识结果作为模糊数据库的原始输入, 而将专家的经验(各测井参数对判识测井-沉积微相的权值)通过学习模块转换成量化的规则后存入模糊知识库。

(6) 应用模糊综合评判将专家意见不断集中并求得样品点隶属各模式(类)的综合顺序, 应用 Zadam 多维推理和集值统计法求得样品点隶属各测井相模式(类)的隶属度。将这两方面的推理结果进行比较, 确定样品点最终归属的测井-沉积相模式(类)。

(7) 按专家系统确定的最佳判识方案输出计算结果和单井的沉积微相柱状剖面。

逐点模糊判识系统的程序流程见图 5。应用此程序在典型井(井段)建立标准测井-沉积相模式之后,便可用于待判井(井段)沉积微相的判识。

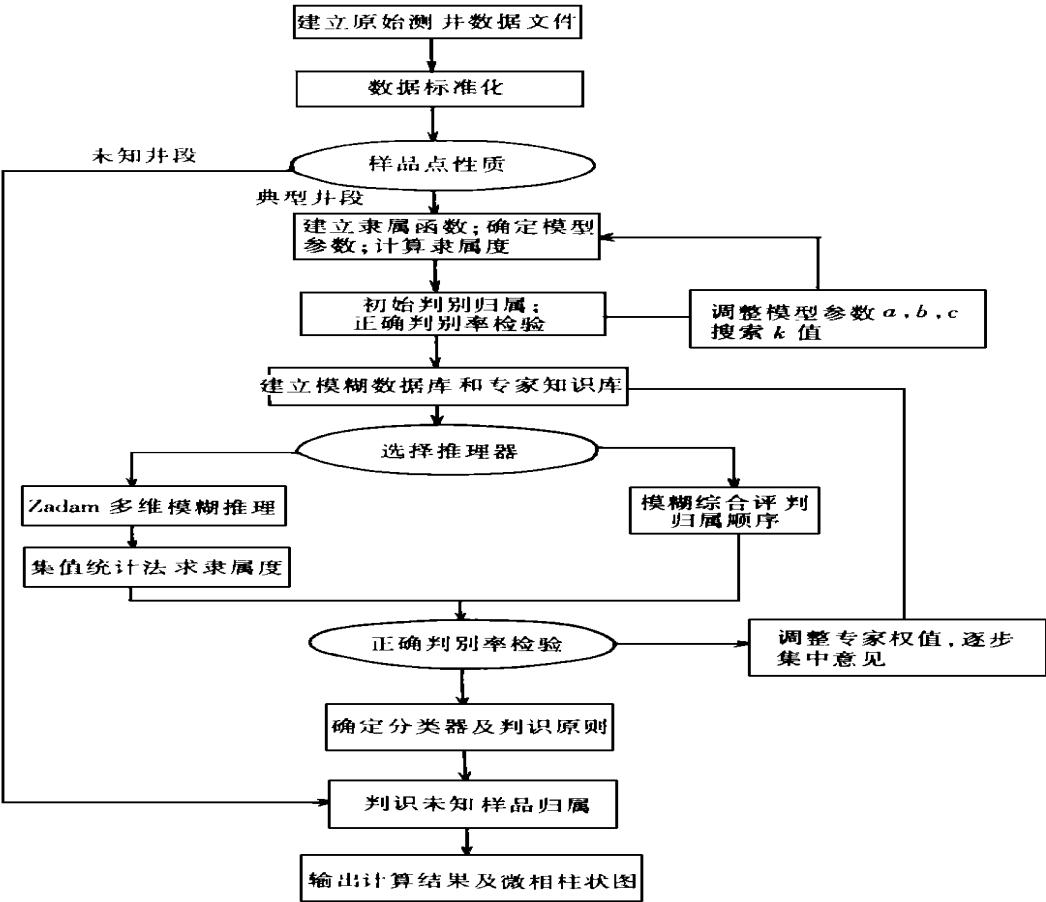


图 5 逐点模糊判识系统的程序框图

4 黄龙组沉积微相及模糊判识效果

晚石炭世,海水自东向西侵入川东地区,形成川东三面环陆的浅水-极浅水的海湾环境。海湾面积达30 000 km<sup>2</sup>以上,仅在东北方向云阳一带与鄂西海域连通。在此环境中建造的黄

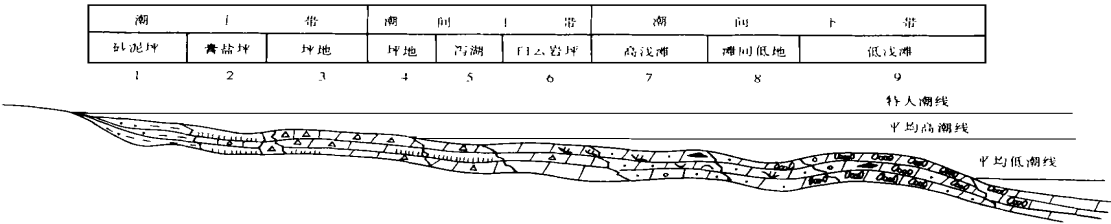


图 6 局限海湾碳酸盐潮汐台地模式

龙组是以白云岩为主(约占剖面厚度的 90%以上)的碳酸盐岩沉积。按局限海湾碳酸盐潮汐台地的沉积相模式(图 6),可将黄龙组划分为三个亚相带:潮上带、潮间上带、潮间下带。潮上

带的主要岩石类型为中-细晶灰岩、角砾灰岩(去膏化、去白云石化)和膏质白云岩、硬石膏。潮间上带主要岩石类型为膏(盐)溶角砾白云岩、干裂角砾白云岩、微粉晶白云岩及藻白云岩。潮间下带系潮汐台地上的高能量带,水体相对较深,形成浅滩微相沉积,主要岩石类型为有孔虫屑白云岩、砂屑白云岩、藻砂屑白云岩、介屑白云岩及鲕粒白云岩。按浅滩的相对高低,可分为高浅滩、低浅滩和滩间低地;按形成的主要岩类可分为有孔虫屑滩、砂屑滩、介屑滩及鲕粒滩微相。据统计,研究区潮间下带浅滩微相中,以有孔虫屑滩和砂屑滩微相为主,总计占浅滩微相厚度的 92.0%。

沉积地层的垂向相序蕴含着十分丰富的沉积环境信息。对黄龙组的相序分析表明,黄龙组剖面的顶、底为潮上带沉积,中部为潮间带沉积。构成剖面主体的潮间带沉积,由多个向上变浅的相序旋回组成。每个相序旋回多由潮间下带浅滩微相开始,向上变为潮间上带的各微相沉积,代表着一次相对海平面的升降周期。在相对海平面下降期间,潮间下带环境转变为潮间上带环境,主要发育潮间上带沉积。

各微相沉积具有不同的储集特征,按储集性能优劣可分为四级。一级为潮间下带有孔虫屑滩微相(包括储集性能处于同一级别的介屑滩、鲕粒滩),主要形成高孔隙度的Ⅰ类(好)和Ⅱ类(较好)储层;二级为潮间下带砂屑滩微相,主要形成Ⅱ类和Ⅱ类(较差)储层;三级为潮间上带各微相,主要形成Ⅱ类和少量Ⅱ类储层;四级为低孔隙度的潮上带沉积,主要形成Ⅳ类储层(非储层)。

从储集性能角度出发,只须区别出潮间带储层段的潮间上带、有孔虫屑滩和砂屑滩微相,即可应用模糊判识系统,对研究区温泉 1-1 等井的黄龙组沉积微相进行判别。以温泉 1-1 井为例,根据各微相的测井参数分布特征选用半柯西分布为其隶属函数,经调整和自动搜索,各微相在各测井参数轴上的隶属函数的  $a, b, k$  值被确定(表 1),按此表中数据,即可建立用隶属函数表示的各微相的测井相模式。

表 1 隶属函数的参数值表

| 测井参数    | 自然伽马/ API |     |     | 补偿中子孔隙度/ % |      |     | 深双侧向/ Ω·m |      |     | 密度/ kg·m <sup>-3</sup> |      |     |
|---------|-----------|-----|-----|------------|------|-----|-----------|------|-----|------------------------|------|-----|
|         | $a$       | $b$ | $k$ | $a$        | $b$  | $k$ | $a$       | $b$  | $k$ | $a$                    | $b$  | $k$ |
| 有孔虫屑滩微相 | 0.05      | 0.3 | 128 | 0.3        | 0.95 | 128 | 0.1       | 0.35 | 128 | 0.05                   | 0.65 | 128 |
| 砂屑滩微相   | 0.20      | 0.3 | 128 | 0.2        | 0.45 | 128 | 0.35      | 0.55 | 128 | 0.50                   | 0.75 | 128 |
| 潮间上带    | 0.05      | 0.2 | 128 | 0.1        | 0.25 | 128 | 0.55      | 0.90 | 128 | 0.60                   | 0.75 | 128 |

表 2 表明温泉 1-1 等井的平均正确判别率达 88.5%。值得指出的是,云安 12 井的判识是应用典型井(云安 9 井)建立的判识数学模型进行的,正确判别率仍达 84.4%。

图 7 列举并对比了温泉 1-1 井和云安 9 井的岩芯微相剖面 and 判识系统输出的判识微相剖面,可以看出,两种剖面符合程度较高。

对研究区黄龙组沉积微相的判识表明,针对黄龙组地质特点开发的逐点模糊判识系统适应于复杂碳酸盐岩剖面测井-沉积相的判识,有着广泛的应用前景。

表 2 微相的正确判别率表

| 井号       | 样品点数/个 | 错判样品点数/个 | 正确判别率/% |
|----------|--------|----------|---------|
|          |        |          |         |
| 温泉 1-1 井 | 120    | 13       | 89.2    |
| 云安 9 井   | 101    | 8        | 92.1    |
| 云安 12 井  | 83     | 13       | 84.4    |

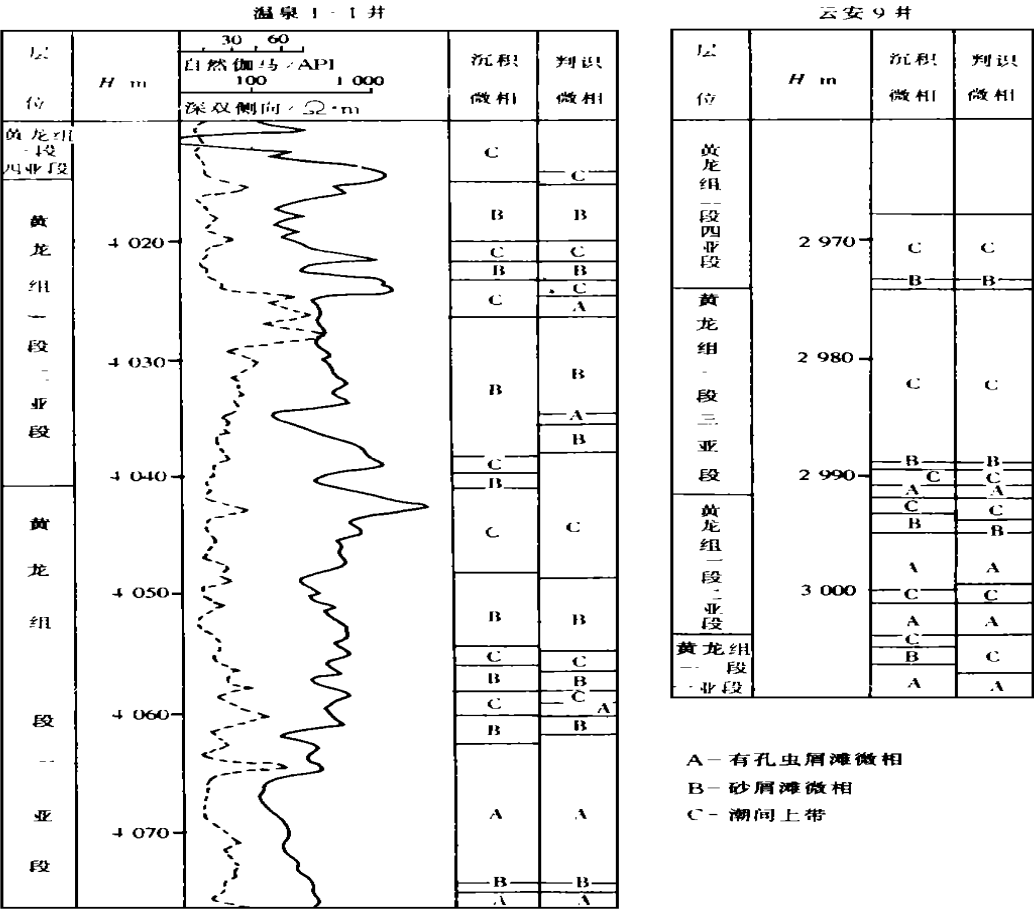


图 7 判识微相与岩芯微相剖面对比

参 考 文 献

1 葛垠. 实用模糊数学. 北京: 科学技术文献出版社, 1989. 4~ 5, 46~ 47  
2 陈立官. 油气田数学地质. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 2

FUZZY RECOGNITION SYSTEM OF LOGGING-SEDIMENTARY FACIES FOR CARBONATE ROCKS

You Zhanglong Wang Xuyan  
(Chengdu Institute of Technology, Chengdu, Sichuan)

Abstract

The fuzzy characters of log layering and log parameter distribution are difficult problems in log-sedimentary facies recognition of carbonatite section of Carboniferous Huanglong Formation in East Sichuan. Based on the introduced conception of subordinate function, the fuzzy recognition system of log-sedimentary facies of carbonatite section is deveolped according to the principle of fuzzy recognition and fuzzy expert dication. The results of three wells' recognition of the sedimentary microfacies of Huanglong Formation show that the rate of correct recognition of the system is up to 85%, which brings it a bright application prospect.