

模糊综合评判法及其 对海相碳酸盐岩相的识别*

王硕儒 刘仲衡 葛吉林

(青岛海洋大学)

提 要

本文提出的碳酸盐岩相模糊识别技术中,隶属度值先用二元对比法排序,然后再定量化,权重用已知样单因素的判对率来确定,模糊关系的合成用“乘—加”算子取代“极小—极大”算子。用此法对鄂中坳陷二叠系海相碳酸盐岩进行了相带划分,共划出潮坪相、局限台洼相、台坡A、B相、台滩相和台洼相等六个相带。相模式用松兹剖面30个样建立,相标志选颜色、方解石、白云石、石英、粘土矿物、古生物1~5类、硅质结核及瘤状体等12个变量。经对京山剖面样的识别,其判对率达80%。

主题词: 模糊识别 综合评价 海相 碳酸盐岩 岩相

一、引 言

以往对岩相的识别多以定性为主,主要根据不同岩相的不同特征和标志进行综合描述和判别,这样往往带有一定的主观臆断性。因此,对岩相识别的定量化研究就成为岩相研究的一个发展方向。

相是沉积环境和特征的综合表现。古地理环境和岩性特征在大的方面,如海相和陆相或碎屑岩相和碳酸盐岩相之间的划分界限是较为明确的,但在海相或碳酸盐岩相内进一步划分相带,界限就不那么明确了,而是很模糊的,尤其是地理环境相似,岩性特征差异不明显的相,在综合多种因素进行相带划分时,“相”的模糊性就体现出来了。模糊综合评判数学模型就是一种适用于这种多因素的岩相识别技术。

在岩相定量化研究中,Imbrie和E. C. Purdy曾用因子分析对巴哈马碳酸盐岩沉积物进行了分类^[1],Wu Xuanzhi和Dirk Kassenaar提出了用测井曲线自动识别碎屑岩剖面的系统^[2],除此之外,有关模糊数学在碳酸盐岩相的定量化研究中的文章目前还很少见到。

* 本文属国家七·五项目54—02部分成果。

二、岩相模糊综合评判数学方法

模糊综合评判涉及三个要素，一是评判集 V ，二是因素集 U ，三是单因素评判^[3]。

用综合评判识别样品的归属，必须先确定出研究区可能存在的几种标准岩相，这就是评判名称集合，它们可构成一个模糊子集。

对碳酸盐岩相判别的因素（如变量和特征标志）集的选定是一项基础性的工作。一般说来，相标志可分岩性、古生物和地球化学元素等三大类，但具体地区都有其自身的相特点。因此，要在研究区各岩相特征的具体研究的基础上来确定因素集，其元素的确定和赋值应能反映不同岩相的古地理条件和岩性特征。

模糊综合评判是在单因素评判的基础上进行的。固定一单因素便存在一个模糊决断，换言之，就是存在一组对象从属于各岩相的隶属度。因此，隶属度的确定是综合评判的一个关键问题。

隶属函数既可以用统计法，也可以用推理法求得。考虑到不同碳酸盐岩相的特征因素值可组合成不同的特征向量，即代表不同的标准模式，采用某样品的特征向量与标准模式的特征向量之间的差值大小作对比，即可确定出相对隶属度，我们采用二元对比排序法来确定隶属函数。但由于二元对比排序只能给出隶属函数的大致形态，无法给出隶属度值，为此，必须对所排序定量化。

一个对象（样品）与两个标准模式相比较，总存在优先于某一模式而更接近另一模式的情况。一般说来，相近的程度可按距离来衡量。设有 n 个标准模式，其中某一特征标志值为 x_{oi} （ $i=1, 2, \dots, n$ ），而样品同一特征标志值为 x ，则就该特征而言，样品与各标准模式间的距离为 $d_i = |x - x_{oi}|$ ，以

$$C_{ij} = \begin{cases} 1 - \frac{d_i}{d_i + d_j} & i \neq j \\ 0 & i = i \\ 0.5 & d_i = d_j = 0 \end{cases} \quad (1)$$

表示 x 接近 x_{oi} 比接近 x_{oj} 优先的程度。当两标准模式按某一变量计算出其与样品的绝对距离为零时，表明该样品与这两个标准模式的优先程度相同，故选 $C_{ii}=0.5$ 是合适的。根据计算的各 C_{ij} 值组成的矩阵（优先选择比矩阵）即可排定 x 接近 $x_{o1}, x_{o2}, \dots, x_{on}$ 的顺序^[4]。

排序结果可按心理物理学理论导出的定量化公式^[5]

$$S(k) = \frac{1n(n+2-k)}{1n(n+2-1)} \quad (2)$$

来确定隶属度。式中 k 为序号。

对每一特征标志都按上述方法计算，从而可构成从 U 到 V 的模糊关系

$$R = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{m1} & S_{m2} & \cdots & S_{mn} \end{pmatrix}$$

其中 m 为特征标志数。

由此,模糊综合评判的计算公式为

$$B = A \circ R \quad (3)$$

式中 $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$,它是 V 的一个模糊子集,其中各元素值分别为判属各相的隶属度值; $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$ 为标志的权重集。

权重的确定是综合评判的第二个关键问题。从(3)式直接求解权重就是解模糊关系方程。现有解法都具有模糊性,只能从备择解集中试算出一个相对来说比较理想的答案,使用极不方便。为此,我们提出如下方法。

因素权重的大小实际上反映了该因素对样品性质(所属岩相)影响的大小,因此,可根据单因素择近原则的判对率作为衡量该因素权重的尺度。判对率高表明该因素对样品性质的影响大,反之则小。如已知相各因素的标准值为 y_{ij} ,各已知样品的特征标志值为 x_{ik} ,若有 $d_{ji} = \min_j |x_{ik} - y_{ij}|$,则第 k 个样按第 i 个因素应判属第 j_1 类。而判对率

$$M_i = L_i / L \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

其中 L 为已知样品的总数, L_i 为按第 i 个因素判别的判对数。判对率经归一化处理,即得权重。

作综合评判正问题解时,算子 (\circ) 的选取也很重要。一般选择较小、极大算子运算容易损失较多有用信息,会使判别失误过多。我们取普通矩阵乘积的乘、加算子运算。

整个评判的计算步骤如下:

1. 输入已知样和未知样各特征标志值;
2. 从已知样特征标志值建立各相标准模式;
3. 按单因素判对率确定因素权重;
4. 按二元对比排序加定量化法求未知样从属各相的隶属度,从而形成关系矩阵 R ;
5. 模糊综合评判正问题计算。

其中,标准模式可用该模型中已知样各标志的平均值向量来表示。而二元对比排序的流程可采用图1所示的方法。

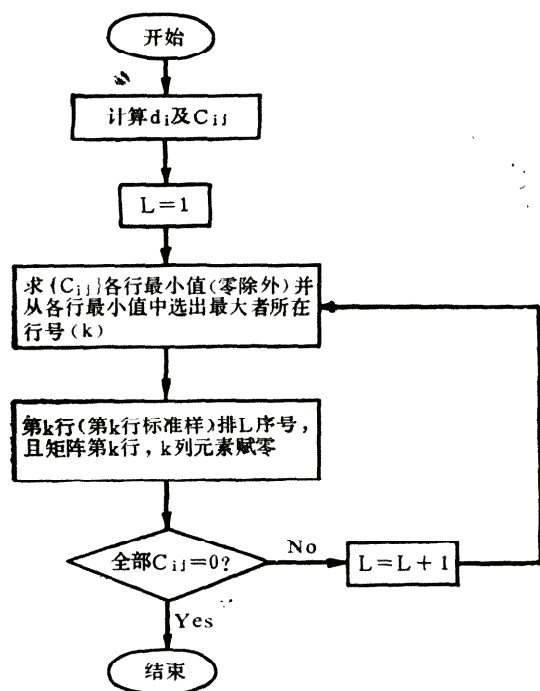


图 1 二元对比排序的一种流程

Fig. 1 A flowchart in the rank of dyadic contrast

三、鄂中拗陷二叠系碳酸盐岩相模糊识别

鄂中拗陷位于扬子地台中部,北与秦岭褶皱带相连,南临华南褶皱带,东西分别与上、下扬子区毗邻。该拗陷二叠系海相碳酸盐岩厚度大,分布广,岩相类型较多,具有广阔的油气

远景。

根据海底地形、水深、潮汐作用、水体能量、生物组合、沉积构造等特征,通过典型剖面研究,可以将本区二叠系碳酸盐岩划分为六个相带,每个相带按其离古海岸的近远顺序简述其特征如下:

1. **潮坪相** 位于古陆边缘,主要受潮汐作用的影响,濒临平原形成清水碳酸盐岩沉积,主要为淡灰色泥晶白云岩,生物含量极少。

2. **局限台洼相** 为碳酸盐台地上半封闭地带,水动力作用较弱,岩性以硅质岩、粘土硅质岩与灰岩互层为特征。岩石中见丰富的浅水底栖生物化石,如腕足化石层。

3. **台坡相B** 水体较深,水流循环良好,岩石类型主要为生屑泥晶灰岩,含硅质结核。古生物种类丰富,主要有钙藻和腕足,其次还有海百合,介形虫等。

4. **台滩相** 为碳酸盐台地浅水区,水体能量中等以上,水流循环也良好,光照充足,利于生物大量繁殖。这些生物被冲刷破碎后形成生物碎屑。岩石以含硅质结核的生屑灰岩为特征,如钙藻有孔虫灰岩,腕足介屑灰岩等。

5. **台坡相A** 水体深度处于浪基面以下和氧化界面以上,岩石类型主要为硅质条带和结核的多种灰岩,色深。生屑有硅质生物和钙质生物两类,填隙物以泥晶质为主。

6. **台洼相** 位于台地上海水较深、平静、开阔的地方。岩石主要为硅质粘土岩及泥灰岩。据野外观察,粘土岩已风化呈褐色,页理清楚,层间含有结核,层面上赋存腕足类、海百合、戟贝等化石。

上述六个岩相特征在湖北省松滋县曲尺河乡鹰嘴尖至黄林岩一带有很好的表现。为此,在这里取标准剖面(松滋主干剖面)。该剖面各相所取的样品分别为潮坪相2个样,局限台洼相8个样,台坡A、B相各5个样,台滩相6个样,台洼相4个样,并视之为各相的标准样。

能表征上述六相带的标志因素经筛选后,因素集 $U = \{\text{颜色, 方解石, 白云石, 石英, 粘土矿物, 古生物1~5类, 硅质结核, 瘤状体}\}$ 。其中未包括地球化学因素,主要是因为分析量不足,不具代表性。

岩石颜色深浅反映了岩石形成时所处氧化还原条件的不同和岩石组份的差异。颜色由浅到深可分成8级:浅灰为1级,浅黑2级,浅灰黑3级,灰黑4级,深灰黑5级,暗灰黑6级,暗黑7级,黑8级。对该标志按等级定值只是初始值,还需进行变换才能进行计算。赋的等级值是根据人的感觉(视觉)而定的。心理物理学认为,“人对观察对象的感觉变化与该对象的事态变化率成正比”。应用这一原理经简单演算即可得出对象的事态(对应的真实值)与人的感觉(对应等级值)成指数关系。由此,采用指数变换后的数值参加计算。

硅质结核及瘤状体的存在反映了相的沉积构造特征。岩石中发育这类构造,则赋值为“1”,否则为“0”。后一因素还作了线性放大($\times 20$)。

古生物种类的多寡,不同的组合面貌可以反映古生活环境的差异。把具有大致相同的生活环境的生物归并为五类。它们是:古生物1主要为苔藓,海棉;古生物2包括钙球,钙藻,生物屑;古生物3为有孔虫,海百合;古生物4为腕足类,棘皮动物(海百合除外);古生物5为腹足类,瓣鳃类,介形虫。

古生物和岩石组份均以样品中的百分含量予以赋值($\times 100$)。

取每个相的标准样,按上述不同标志求取平均值组成的平均值向量即构成该相的标准模

式。表1为本区六个相的标准模式表。表中数据分别对应于不同岩相不同变量的特征数值,注释中并附有按(4)式计算获得的各因素权重值。

表 1 鄂中坳陷二叠系碳酸盐岩相标准模式及因素权重*

Table 1 The Standard Pattern of Marine Carbonate Facies in Permian Period in Central Hubei and the Weight of Respective Variables

相 平均值 变量名	潮 坪	台坡A	台 洼	台坡B	局限台洼	台 滩
(1)*	9.00	44.80	224.00	13.60	80.00	6.00
(2)	8.50	17.36	4.90	19.92	19.62	19.80
(3)	11.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
(4)	0.00	2.20	3.00	0.00	0.05	0.00
(5)	0.00	0.00	10.75	0.00	0.00	0.00
(6)	12.50	4.20	0.00	0.58	0.75	14.25
(7)	3.80	2.45	0.00	36.22	15.51	29.78
(8)	1.25	11.56	0.00	19.74	5.79	13.00
(9)	1.00	1.40	0.00	4.90	3.45	19.83
(10)	6.25	0.15	0.00	5.11	1.84	7.87
(11)	1.00	1.00	0.25	0.80	0.88	0.83
(12)	0.00	0.00	0.00	0.00	15.00	0.00

* 变量: (1) —颜色, $a_1=0.1695$; (2) —方解石, $a_2=0.1187$; (3) —白云石, $a_3=0.0508$; (4) —石英, $a_4=0.0508$; (5) —粘土矿物, $a_5=0.0424$; (6) —古生物1, $a_6=0.0508$; (7) —古生物2, $a_7=0.0678$; (8) —古生物3, $a_8=0.1101$; (9) —古生物4, $a_9=0.0932$; (10) —古生物5, $a_{10}=0.1355$; (11) —硅质结核, $a_{11}=0.0424$; (12) —瘤状体, $a_{12}=0.0678$ 。

根据表1所列标准模式向量值及因素权重,可以对本区二叠系的任意未知样品进行识别对比。为此,选湖北省京山县境内一条剖面所取样品对之识别。该剖面的岩相表现以局限台洼相,台洼相和台坡A相最为明显,台坡B相的表现较差,而台滩相和潮坪相都缺失。尽管如此,对方法的检验仍是可取的。表2列出了该剖面32个样的12个变量的数据。

将表2数据与六个标准模式数据按上节所述方法计算单因素时,样品从属各相的隶属度。对所有因素都以同样方法计算,从而构成R矩阵($m=12$, $n=6$)。之后,按表1所附因素权重A用(3)式计算出各样品判属各相的综合隶属度。计算结果如表3所示。

表中也列出了按最大隶属原则进行确切识别的结果。确切判对样以符号*表示,可以看出有25个样判对。

由于评判结果所具有的模糊性,因此对一个样品的识别,不仅要注意到最大隶属度,也要注意与最大隶属度相差甚小的第二大隶属度。例如24号样,从属台滩相与从属台坡A相的隶属度值很接近(归一化值: $b_6=0.2005$, $b_4=0.1970$),究竟应判属台滩相还是台坡A相,难于确定。这时样品归属的模糊性显示最明显,可考虑其判属两岩相。31号样也有这种类似情况。如果考虑到这两个样实际分属台坡A相和台坡B相,则实际判对率为78.1%~84.4%。这样的识别率对于碳酸盐岩相来说应是不错的了。

由此可以得出结论,文中给出的具体模糊综合评判数学方法是可行的。针对鄂中地区所建立的二叠系碳酸盐岩相标准模式是有效的。这表明,该方法的具体实现对于碳酸盐岩相的识别提供了一个辅助的然而却是良好的手段。

表 2 京山剖面样数据*

Table 2 Data from Samples in the Jingshan Section

特征值 样品号	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
1	16.0	19.6	0.0	0.2	0.2	2.6	19.5	32.5	3.9	22.1	0.0	0.0
2	128.0	19.6	0.0	0.0	0.0	0.0	1.3	2.6	2.6	6.5	0.0	20.0
3	32.0	19.6	0.0	0.1	0.2	0.0	1.9	5.2	4.5	7.8	0.0	20.0
4	256.0	0.0	0.0	20.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	32.0	19.2	0.0	0.2	0.0	1.3	6.5	2.6	3.9	13.0	1.0	0.0
6	32.0	19.6	0.0	0.1	0.1	0.0	3.9	2.6	2.6	6.5	0.0	20.0
7	32.0	19.6	0.0	0.2	0.2	0.0	0.6	2.6	1.9	7.8	0.0	20.0
8	8.0	19.6	0.0	0.4	0.0	1.3	2.6	1.3	2.6	5.2	1.0	0.0
9	128.0	19.6	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	2.6	0.0	3.9	1.0	0.0
10	128.0	19.6	0.0	0.1	0.2	0.0	1.3	2.9	1.3	6.5	1.0	0.0
11	128.0	19.6	0.0	0.0	0.2	1.3	0.6	0.0	1.3	3.9	1.0	0.0
12	64.0	18.0	1.0	0.2	0.6	0.0	0.6	1.3	2.6	9.1	0.0	20.0
13	128.0	18.6	1.0	0.0	0.2	1.3	0.0	2.6	1.3	3.9	1.0	0.0
14	32.0	15.6	4.0	0.0	0.2	1.3	1.3	1.3	2.6	9.1	0.0	0.0
15	256.0	0.0	0.2	19.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	128.0	0.0	0.0	0.2	19.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	256.0	0.0	0.0	19.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	128.0	0.0	0.0	0.1	19.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	256.0	0.0	0.0	19.6	0.0	13.0	6.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	256.0	0.0	0.0	19.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	128.0	0.0	0.0	19.8	0.0	13.0	0.0	1.3	5.2	2.6	0.0	0.0
22	16.0	19.4	0.0	0.2	0.4	2.6	0.0	7.8	2.6	33.8	1.0	0.0
23	8.0	19.8	0.0	0.0	0.2	0.0	41.6	13.0	1.3	2.6	0.0	0.0
24	4.0	19.6	0.0	0.0	0.2	0.0	46.8	13.0	6.5	15.6	0.0	0.0
25	4.0	19.6	0.0	0.1	0.2	1.0	42.3	10.4	6.6	4.2	0.0	0.0
26	4.0	19.8	0.0	0.0	0.2	1.3	45.5	32.5	3.9	5.2	0.0	0.0
27	4.0	19.8	0.0	0.0	0.2	0.0	42.9	19.5	10.4	1.3	0.0	0.0
28	4.0	19.8	0.0	0.0	0.2	1.3	0.0	26.0	5.2	1.3	0.0	0.0
29	4.0	19.6	0.0	0.0	0.4	45.5	0.0	3.9	7.8	3.9	0.0	0.0
30	8.0	0.0	0.0	0.1	19.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	32.0	19.8	0.0	0.0	0.2	2.6	5.2	6.5	33.8	14.3	0.0	0.0
32	128.0	0.0	0.0	0.2	19.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

* 变量名同表1.

表 3 京山剖面样判别结果

Table 3 Results of Judged Samples in the Jingshan Section

求属度 品号	潮 坪 (1)	台 坡 A (2)	台 洼 (3)	台 坡 B (4)	局限台洼 (5)	台 滩 (6)	确切模式
1	0.6873	0.6968	0.4751	0.8857	0.7905	0.8457	(4) *
2	0.6749	0.7503	0.6591	0.7173	0.8945	0.6844	(5) *
3	0.7026	0.7371	0.5642	0.7847	0.8334	0.7590	(5) *
4	0.6619	0.7915	0.9425	0.6330	0.7851	0.5671	(3) *
5	0.7391	0.7478	0.5465	0.7798	0.7997	0.7682	(5) *

续表

相 隶属度 样品号	潮 评 (1)	台 坡 A (2)	台 注 (3)	台 坡 B (4)	局限台注 (5)	台 滩 (6)	确切模式
6	0.7376	0.7404	0.5744	0.7584	0.8220	0.7484	(5)*
7	0.7241	0.7476	0.5995	0.7448	0.8061	0.7590	(5)*
8	0.7731	0.7127	0.5465	0.7682	0.7997	0.7798	(5)
9	0.6904	0.7543	0.7129	0.7355	0.8650	0.6230	(5)*
10	0.7049	0.7557	0.6538	0.7124	0.8560	0.6982	(5)*
11	0.6744	0.7880	0.6970	0.7268	0.8737	0.6183	(5)*
12	0.6964	0.7607	0.5859	0.7264	0.8853	0.7234	(5)*
13	0.6830	0.8013	0.6884	0.7164	0.8737	0.6183	(5)*
14	0.7220	0.8063	0.5766	0.7455	0.7785	0.7486	(2)*
15	0.6619	0.7915	0.9425	0.6330	0.7851	0.4571	(2)*
16	0.6710	0.7831	0.9083	0.6413	0.8031	0.5742	(3)*
17	0.6619	0.7915	0.9425	0.6330	0.7851	0.4571	(3)*
18	0.6710	0.7831	0.9083	0.6413	0.8031	0.5742	(3)*
19	0.6837	0.7972	0.9103	0.6152	0.7794	0.5953	(3)*
20	0.6619	0.7915	0.9425	0.6330	0.7851	0.4571	(3)*
21	0.6731	0.8128	0.7946	0.6704	0.8348	0.5953	(5)
22	0.7225	0.7454	0.5138	0.7692	0.8145	0.8145	(6)
23	0.6571	0.7737	0.4510	0.8346	0.7661	0.7886	(4)*
24	0.6723	0.7103	0.4895	0.8636	0.7670	0.8784	(6)-(4)
25	0.6957	0.7011	0.4808	0.8639	0.8034	0.8362	(4)*
26	0.6723	0.7002	0.4808	0.9090	0.7627	0.8560	(4)*
27	0.6248	0.7477	0.5331	0.8779	0.7852	0.8123	(4)*
28	0.6324	0.7714	0.5865	0.8350	0.7862	0.7695	(4)*
29	0.7238	0.7370	0.5790	0.7749	0.8126	0.7539	(5)
30	0.7436	0.7484	0.8298	0.6605	0.7305	0.6683	(3)
31	0.6907	0.7859	0.5099	0.7842	0.7664	0.8438	(6)-(2)
21	0.6710	0.7831	0.9083	0.6413	0.8031	0.5742	(3)*

(本文收到日期1990年11月17日)

(编辑 康剑)

参 考 文 献

- [1] W. E. Ham, L. C. Pray主编, 碳酸盐岩分类文集, 科学技术文献出版社重庆分社, 1981
- [2] Wu Xuanzhi Dirk kassenaar, and Edo Nayland, 测井曲线计算机辅助解释, SEG第55届年会论文集, 石油工业出版社, 1986
- [3] 汪培庄, 模糊集合论及其应用, 上海科技出版社, 1983
- [4] 王硕儒, 曹钦臣, 从模糊相似优先比法计算结果看胶州湾沉积物的类型, 黄渤海海洋, 1989, 第7卷, 第2期
- [5] 于宏义, 孙顺庚, 刘杰, 定性排序和定量转化的研究, 模糊数学, 1987, 第3, 4期

FUZZY COMPREHENSIVE JUDGE TECHNIQUE APPLIED TO THE IDENTIFICATION OF MARINE CARBONATE FACIES

Wang Shuoru Liu Zhongheng Ge Jilin
(*Ocean University of Qingdao*)

Abstract

On the basis of fuzzy comprehensive judge, a practical fuzzy technique is presented to identify marine carbonate facies in this paper. The grade of membership is determined by a method of rank in the dyadic contrast and quatitative technique. According to the rate of right judging for known samples, a method of determining the weight of factor is presented, and "product-sum" operator should be used instead of "min-max". In central Hubei, the Permian marine carbonatite can be devided into six facies. They are tidal flat, platform slope A, platform slope B, platform shoal, platform hollow and restricted platform hollow. The facies models are built by using 30 samples in the Songzi section. The selected factors are color, calcite, dolomite, quartz, clay minetal, paleontologic 1-5, siliceous nodal and tumrous body. The results of the fuzzy recognition in the Jinshan section show that the rate of right judging is about 80%, and the method is effective.