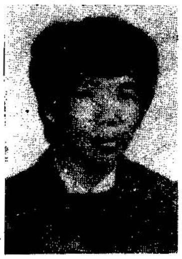
断块油藏中的断层封闭性模糊综合评判

邓俊国 刘泽容 杨少春

（石油大学油藏地质研究所，山东东营）



本文分析了断层封闭性的形成条件，以地震、地质、测井资料为依据，应用模糊综合评判技术，建立了断层封闭性模糊综合评判矩阵及模糊综合评判数学模型。应用此模型，研究了桥口油田主要断层的封闭性，论述了该区断层对油气的遮挡作用。建立了一整套适合不同勘探开发阶段断层封闭性评价方法。

关键词 断层封闭性 模糊综合评判 最大隶属度

油气田勘探实践证明，在生、储、盖组合非常有利的地区，并非所有的断块都能聚集油气，这与对断块油气藏起控制作用的断层是否封闭有很大关系。因此，查明断层是否封闭是判断断块油气藏是否富集油气的关键。

以往对断层封闭性的研究以定性描述为主，主要依据断层两侧岩性、物性配置关系等因素对断层的封闭性进行分析，现在开始进一步对断层封闭性进行定量化研究。定性与定量结合将是今后的发展方向。

在断层封闭性定量化研究方面，W. Downey（1975）利用概率法从理论上对断层的数量与圈闭性的关系作了推断[1]。曹瑞成和陈章明（1992），应用逻辑信息法建立了早期勘探区断层封闭性的统计预测模型，并用象权值的大小评价断层封闭性[2]。本文综合考虑影响断层封闭性的各种因素，应用模糊综合评判技术，建立了适合不同勘探开发阶段断层封闭性数学模型及评价方法。

1 断层封闭性模糊综合评价模型的建立[3]

断层封闭性模糊综合评价就是应用模糊变换和最大隶属度原则，考虑影响断层封闭性的各个因素，对断层封闭性进行综合研究。

1.1 综合评价的数学模型

设着眼因素集合为：$U=\{u_1, u_2, \cdots, u_m\}$，决择评语集合为：$V=(v_1, v_2, \cdots, v_m)$

设单因素评判矩阵为 $R=[rij]\, m\times n$，其中 rij 为第 i 种因素对第 j 种评语的隶属度，又设单因素集合中各因素的权重 $A=(a_1, a_2, \cdots, a_m)$，则模糊综合评价方程为：

$$B=A_{\circ}R$$

其中 $B=[b_1, b_2, \cdots, b_m]$

$b_i=(a_1*r_{1j})+(a_2*r_{2j})+\cdots+(a_n*r_{nj})\ (j=1, 2, \cdots, n)$.

1.2 模型计算

(1) 主因素决定型：$M(\wedge, \vee)$

用“∧”代替“*”，用“∨”代替“+”，得

$$b_j=\bigvee_{i=1}^{n}(a_i\wedge r_{ij})\quad(j=1, 2, \cdots, m)$$

式中 ∧·∨——分别为取小（min）和取大（max）运算，即：

$$b_j=\max\{\min(a_1\wedge r_{ij}), \min(a_2\wedge r_{2j}, \cdots, \min(a_n\wedge r_{nj})\}$$

(2) 主因素突出型 $M(\cdot, \vee)$

用“·”代替“*”，用“∨”代替“+”，得

$$b_j=\bigvee_{i=1}^{n}a_ir_{ij}\quad(j=1, 2, \cdots, m)$$

(3) 加权平均型：$M(\cdot, +)$

用“·”代替“*”，用“+”代替“*”，即采用实数矩阵算法。

2 建立单因素评价矩阵 R

2.1 确定着眼因素集和评语集

在断层封闭性综合评价中，所考虑的着眼因素集为：

$U=\{u_1, u_2, \cdots, u_7\}$

式中：u_1—断层力学性质；u_2—断层两侧岩性配置关系；u_3—断层活动强度；u_4—排驱压力；u_5—断层产状；u_6—断层两侧岩层产状配置关系；u_7—断层活动期与油气运移期配置关系。

评语集 V 用被评价断层的集合替代，即：

$V=\{$断层 1，断层 2，…，断层 m$\}$

2.2 建立单因素评判矩阵

根据专家知识，结合研究区实际情况确定各评价因素的隶属函数，进而建立单因素评判矩阵。

2.2.1 断层两侧岩性配置关系[4,5]

断层一侧储集层受到封闭或遮挡一般有以下三种情况：

(1) 断层两侧砂岩与泥岩或膏盐接触，断层封闭性较好。

如桥 29—23 井 Es_3^1 厚层泥岩与桥 21—3 井的砂岩段相对应（图 1），其砂层完全被桥 25—23 井泥岩段封堵，断层是封闭的。

(2) 断裂带中的构造岩为不渗透岩石，断层封闭性较好。

如桥 29—11 井 Es_3^1 中几套砂岩段与桥 29—2 井 Es_3^1 中油层段相对应，在桥 29—2Es_3^1 中获得了高产工业油流，而桥 29—11 井中的砂岩无油气显示（图 2），说明断裂带中存在不渗透构造岩，断层封闭性强。

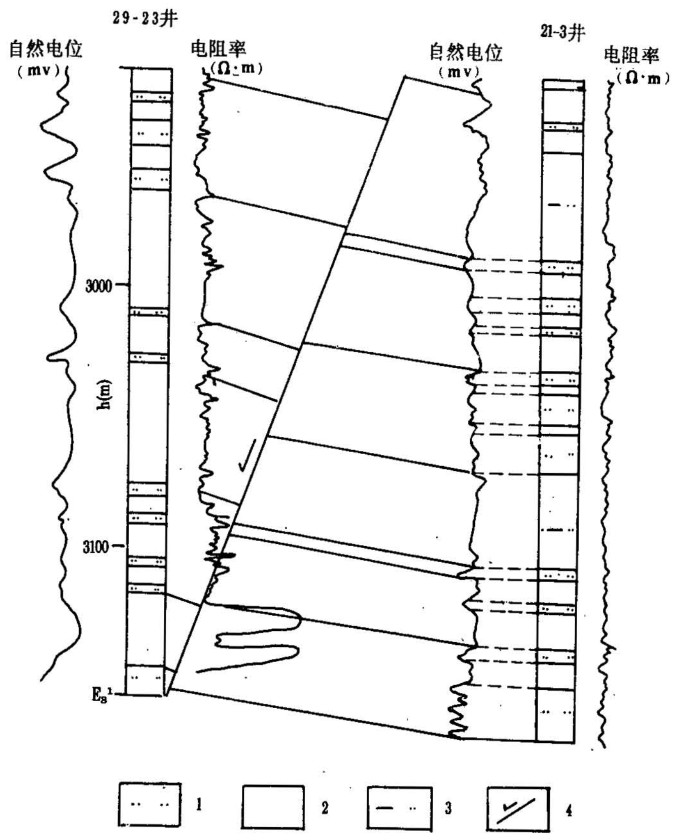


图 1　砂岩与泥岩接触形成断层封闭

Fig. 1　Fault sealing formed by the contact between sandstone and mudstone

1—砂岩；2—泥岩；3—粉砂质泥岩；4—断层

1—Siltstone；2—mudstone；3—silty mudstone；4—fault

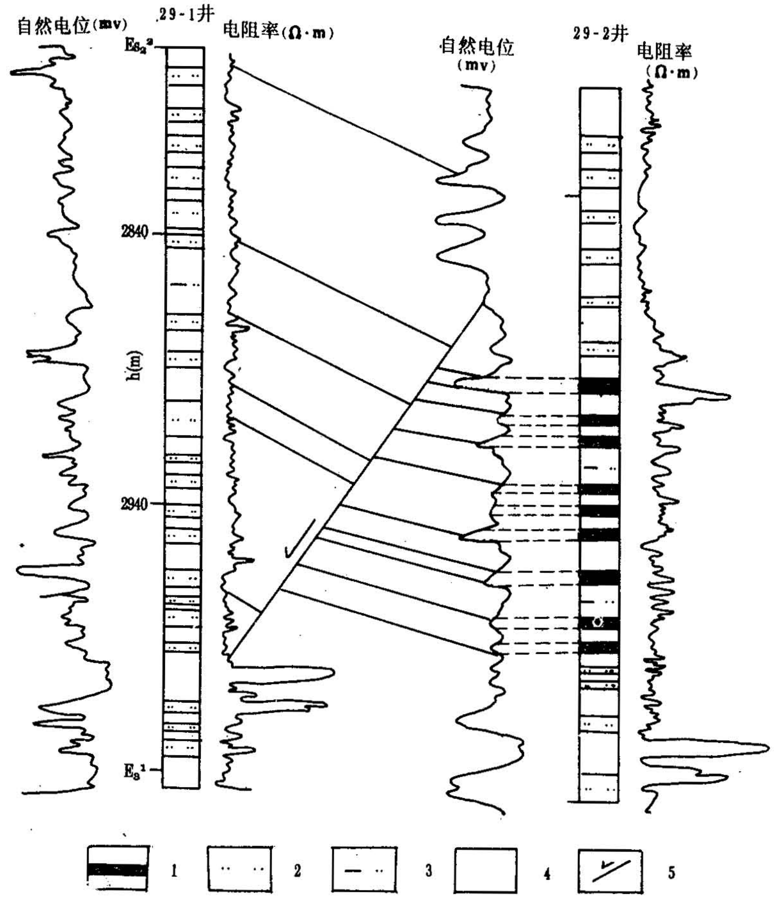


图 2　断裂带内不渗透构造岩形成断层封闭

Fig. 2　Fault sealing formed by impermeable tectonite in a fault zone

1—油层；2—粉砂岩；3—粉砂质泥岩；4—泥岩；5—断层

1—Reservoir；2—siltstone；3—silty mudstone；4—mudstone；5—fault

（3）断层两侧砂岩与砂岩接触，断层可能是封闭的，也可能是不封闭的，造成断层封闭的原因可能有两种：a. 相接触砂岩的排驱压力不同；b. 断裂带中的构造岩为不渗透岩石（图2）。

依据上述分析，确定岩性配置关系的隶属度见表1。

2.2.2 断层力学性质

断层力学性质一般可分为压性、压扭性、扭性、张扭性、张性等五种类型。压性和压扭性断层中多发育压性构造岩、胶结致密、孔隙度小，对油气起封闭作用；张性和张扭性断层中多发育张性构造岩，胶结疏松，裂缝发育，对油气起通道作用（表1）。

表1 断层封闭性模糊综合评判隶属度

Table 1 The subordinate grade of fuzzy comprehensive judgement on the sealing of a fault

影响因素	评价标志	隶属度	备注
岩性配置关系	断层两盘砂岩与泥岩对置	1	L—断层落差（m）
	断层两盘同时代砂岩对置	0	H—盖层厚度（m）
	断层两盘不同时代砂岩对置	0.5	P_1 P_2 >两侧储层压力（MPa）
	断层面为不渗透物所充填	1	hx—断块叠盖厚度（m）
断层力学性质	压性断层	1	P_F—断层排驱压力（MPa）
	压扭性断层	0.9	θ—断层倾角
	扭性断层	0.7	
	张扭性断层	0.5	
	张性断层	0	
断层活动强度	当 $L>hx$ 时	0.5	
	当 $L<hx$ 时	1	
排驱压力	$P_F>P_1$ 且 $P_F>P_2$	1	
	$P_F<P_1$ 且 $P_F<P_2$	0	
	$P_F>P_1>P_2$ 或 $P_F>P_2>P_1$	0.7	
断面产状	$\theta\leqslant30°$	1	
	$30°<\theta\leqslant45°$	0.8	
	$45°<\theta\leqslant60°$	0.6	
	$60°<\theta<80°$	0.4	
	$\theta>80°$	0	
岩层产状配置关系	顺向正断层	0.5	
	反向正断层	0.8	
	反向屋脊正断层	0	
	屋脊式正断层	0.8	
断层活动期与油气运移期配置关系	断层在油气运移期活动	0.3	
	断层在油气运移期停止活动	0.8	
	断层在油气运移后仍活动	0	

2.2.3　断层活动强度[6]

油气能否沿断层面作垂向运移，在很大程度上取决于断层落差 L 及盖层厚度 H。若断层落差远远大于盖层厚度，断层两侧储集层相接触，会使断层失去封闭油气的能力；若断层落差小于盖层厚度时，断层两侧的盖层未完全错开，顶部封闭层通常为同一时代的韧性层和未压实的泥岩，断层垂向封闭油气的能力较好，其隶属度为：

$$\mu_A(u_3)=\begin{cases}1 & \text{当 } L<hx \text{ 时}\\ 0.5 & \text{当 } L>hx \text{ 时}\end{cases}$$

其中：$$h_x=H\cdot\frac{\sin\theta}{\sin(\theta+\alpha)}-h$$

θ—断层倾角；α—地层倾角；h—断块叠盖厚度（m）；H—盖层厚度（m）。

桥口地区的二、三级封油断层落差一般在 40—300m，区域性盖层厚度变化范围大，一般 20—400m，取最小叠盖厚度为 20m。

2.2.4　断层两侧储层排驱压力[3,4]

断层面及断层两侧储层的排驱压力是确定断层封闭与否的决定因素。若断层排驱压力 P_F 大于两侧储层的排驱压力 P_1 及 P_2，断层是封闭的；若断层排驱压力比两侧储层的排驱压力低，或者断层由一系列低排驱压力的开口裂缝组成，断层对垂向运移是开启的，其隶属度见表 1。

2.2.5　断层产状

在不考虑其它因素情况下，正断层面上所承受的压力是由断层下降盘上覆地层引起的。在断面上所承受的压应力 P 为：

$$P=h\,\frac{\rho-\rho_W}{10}\cos\theta$$

式中：h—断点深度（m）；ρ、ρ_W—岩石和地层水密度（g/cm_3）；θ—断层倾角。

由上式可知，P 的大小主要取决于断层倾角 θ，θ 越小作用于断面裂缝上的压应力越大，当 P 大于裂缝壁的抗压强度时，断面裂缝将闭合，并逐渐形成封闭，其隶属度见表 1。

2.2.6　断层两侧岩层产状配置关系

若断层两侧岩层呈同向倾斜或反向屋脊对置，则断层面本身具有很高的渗透性，断层封闭能力差；若断层两侧或一侧岩层与断层倾向相反，则断层封闭性较好，其隶属度见表 1。

2.2.7　断层活动期与油气运移期配置关系

在油气聚集期已停止活动的断层，其封闭性较强，对油气运移起封闭作用，在油气大规模运移期强烈活动的断层具有良好的开启性，对油气运移起通道作用，油气大规模运移后仍强烈活动的断层，具纵向开启性，对油气藏形成起破坏作用。其隶属度见表 1。

在对桥口地区各断裂的地震、地质及测井信息进行综合分析后，依据上述标准建立桥口地区断层封闭性单因素的评判矩阵(表 2)。

3　确定权重向量 A

确定权重向量 A 的方法有多种，较常用的有德尔斐法、专家调查法和判断矩阵分析法。

本文利用判断矩阵分析法确定权重向量 A 如下：

$$A=[0.21,0.21,0.19,0.16,0.11,0.07,0.05]$$

表2 桥口地区断层封闭性模糊评判矩阵（R）

Table 2 The fuzzy judgement matrix for the sealing of a faults in the Qiaokou area

因素 \ R \ 断层	李屯Ⅱ号	黄河Ⅱ号	黄河Ⅳ号	玉皇庙	桥 38
力学性质	0.9	0.9	0.9	0	0
排驱压力	1		1		0
岩性配置	1	1	1	0	0
活动强度	1	0.5	1	0.5	1
断层产状	1	0.6	0.6	0.6	0.6
活动时期	0.8	0.8	0.8	0.3	0.8
产状配置	0.8	0.8	0.8	0.8	0

4 计算方法及评价结果

用M（∧，∨）、M（·，∨）及M（·，+）三种模型分别计算 $B=A_0R$，并对得出的综合评判结论进行比较。各断层模糊综合评判结果见表3。

表3 桥口油田断层封闭性模糊综合评判结果

Table 3 The result of fuzzy comprehensive judgement for the sealing of a faults in the Qiaokou erea

断层 \ 计算方法	M（∧，∨）	M（·，∨）	M（·，+）	阈 值	评价结果
李屯Ⅱ号	0.21	0.21	0.955	λ>0.9	封闭性较好
黄河Ⅳ号	0.21	0.21	0.991		
黄河Ⅱ号	0.21	0.21	0.779	0.7<λ<0.9	封闭性较好
玉皇庙	0.16	0.08	0.307		
桥 38	0.16	0.16	0.207	λ<0.9	不封闭

由上表可知，利用M（·，+）模型计算结果最佳，所以采用M（·，+）模型的计算结果对桥口地区的主要断裂进行评价。根据上述计算结果，结合工区实际情况，确定阈值λ，评价结果见表3。

评价结果表明，桥口地区李屯Ⅱ号、黄河Ⅳ号断层封闭性最好，黄河Ⅱ号断裂封闭性较好，它们是桥口地区主干断层，对油气聚集起遮挡作用；玉皇庙和桥38断层为开启性断层，为油气运移通道。这种配置关系使桥口地区具有良好的油气运移聚集条件。

5 模型检验

断层封闭与否最终要受到油藏动态及静态资料的检验。断层两盘流体性质的差异、油水界面相差悬殊及各自具有独立的压力系统是断层封闭的重要标志，如桥 21 断块和桥 38 断块是被黄河Ⅳ号断层切割的两相邻断块，但 S_3^1 流体性质有很大差异；而玉皇庙断层南北两盘 Es_2^2 流体性质基本一致（表 4），说明黄河Ⅳ号断层为封闭性断层，玉皇庙断层为开启性断层。

表 4　桥口油田流体性质变化表

Table 4　The change table of fluid property in Qiaokou

断层 \ 流体性质		比　重 g/cm³	粘　度 mpa·s	含　腊　量 %	含　硫　量 %	胶　质 %
黄河Ⅳ（Es_3^1）	西盘	0.829	568	25.26	0.025	6.96
	东盘	0.846	1490	30.98	0.115	13.28
玉皇庙（Es_2^2）	北盘	0.829	699	32.97	0.12	10.05
	南盘	0.822	532	21.99	0.09	9.41

开启性断层两盘处于统一压力系统，因此各井压力折算到同一深度时的压力相等，同种流体的压力与深度的线性关系是唯一的；封闭性断层两盘其压力变化情况与开启性断层相反。如被黄河Ⅱ号断层所分隔的桥 30 断块和桥 29 断块的压力梯度方程分别为：

$$桥 30 块：P=-24.05+0.02H$$

$$桥 29 块：P=2.59+0.01H$$

桥 30 块 Es_2^2 油水界面为 2 555m，桥 29 块 Es_2^2 油水界面为 2 575m，不同的压力梯度方程和油水界面说明桥 30 块和桥 29 块各自具有独立的压力系统。证实了黄河Ⅱ号断层为封闭性断层。

上述分析结果表明，断层封闭性模糊综合评价结果与油藏动、静态资料分析结果一致。说明所建模型可靠。

总之，模型检验结果表明，桥口油田断层封闭性模糊综合评判结果与油藏动、静态资料分析结果完全一致。这表明，采用模糊综合评判技术对断层封闭性进行评价是有效的。该技术可用于不同勘探、开发阶段断层封闭性的评价。

参　考　文　献

1　Marlan M W. 断裂作用与烃类圈闭. 第 58 届 SEG 年会论文摘要，石油科技情报所，1988.

2　曹瑞成，陈章明. 早期勘探区断层封闭性评价方法. 石油学报，1992，(1)：13—22.

3　张跃，邹寿平等著. 模糊数学方法及其应用. 北京：煤炭工业出版社，1992，1—205 页.

4　Smith D A. Theoretial consideration of sealing and nonsealing faults，A. A. P. G. Bull，1966，50 (2)：363—374.

5　Eualuating M W，Seals for hydrocarbon accumulations，A. A. P. G. Bull，1984，68 (11)：1752—1763.

6　刘明义. 东濮凹陷断块油气藏封堵条件的分析方法. 石油地球物理勘探，1987，(6)：558—664.

FUZZY COMPREHENSIVE JUDGEMENT ON THE SEALING OF A FAULT IN A FAULT BLOCK RESERVOIR

Deng Junguo, Liu Zerong and Yang Shaochun

(University of Petroleum, Dongying, Shandong)

Abstract

This paper analyzes the conditions for the formation of sealing of a fault. According to the seismic, geological and log data and by applying the technique of fuzzy comprehensive jugement, the fuzzy comprehensive judgement matrix and mathematic model for the sealing of a fault have been established. This model is applied to the study of the sealing of main faults in the Qiaokou Oil Field, and the barrier of a fault to hydrocarbon accumulation in this area. A set of methods suitable for evaluating the sealing of a fault in different stages of exploration and development have been set up.

Key words: fuzzy comprehensive judgement, sealing of a fault, maximum subordinate grade

作 者 简 介

邓俊国，1957 年生。1982 年毕业于长春地质学院地质系，1989 年获构造地质专业硕士学位。现为石油大学油藏地质研究所讲师，从事油藏构造及油藏评价方面的研究。通讯地址：山东省东营市石油大学。邮政编码：257062。