

模糊数学在长庆气田碳酸盐岩储层评价中的应用

李中锋 何顺利

(石油大学·北京)

李中锋等.模糊数学在长庆气田碳酸盐岩储层评价中的应用.天然气工业,2005;25(3):55~57

摘要 为了综合反映孔隙度、渗透率、准残溶率、有效储能指数、有效连通指数、次生灰化指数等六个参数对残余岩溶强度的贡献程度,研究残余岩溶强度与储层富集区域的关系,文章借鉴前人对古岩溶的研究成果,运用模糊数学评判法对以上各参数进行综合处理,得到一个反映残余岩溶强度的综合指标——残余岩溶强度模糊指数,并用此参数对储层进行评价。在长庆气田靖边区选取了93口开发井和探井,在单因素评价的基础上,运用模糊综合评判方法对储层进行综合评判,把储层分为四类:I、II类可靠;III类能达到工业气流产量;IV类不能达到工业气流产量。评判结果显示,在渗透率和有效连通指数权重选取较大的情况下,所选取的3个权重集评价结果相差不大,故别的参数对评判结果影响相对较小;同时评价结果与实际情况具有很大的一致性,可见该方法可使储层的优劣定量化。这表明模糊综合评判方法对碳酸盐岩储层评价具有一定的实用价值。

关键词 模糊数学 碳酸盐岩 储集层 岩溶作用 综合评价

一、气田基本概况

在奥陶纪上马家沟期,长庆气田沉积了一套潮坪相碳酸盐岩,此后,加里东运动使盆地基底整体抬升,遭受大气淡水淋滤及风化剥蚀作用,直至中石炭世才结束,其间经历了130~150 Ma地质历史,在马家沟组顶部形成风化壳。人们习惯将马家沟组自下而上分为5段,再将第五段自上而下分为10亚段,本文的研究的主要对象是主力气层马五³。

岩溶相是岩溶环境的古代产物,岩溶相对化学岩类风化壳中油气的聚集与产能起着非常重要的控制作用。该区奥陶系风化壳有一个共同特征,即不同成因类型的角砾状碳酸盐岩十分发育,其累计厚度一般占风化壳段的60%~90%。这说明其岩溶程度颇高,处于地下水冲蚀、侵蚀作用为主导的岩溶中后期阶段,形成了一系列大小、重重叠叠的岩溶洞穴。岩溶强度是表征易溶岩类、特别是碳酸盐岩地区溶蚀强弱的一个综合指标。残余岩溶强度是指易溶盐类埋藏压实改造后残留的溶蚀强度,是表示碳酸盐岩储集性的重要参数。

二、选取评判参数

由于长庆气田岩溶程度高,所以用单一因素对

储层进行评判分类不能准确表征储层的特征。为综合反映各因素对残余岩溶强度的贡献,研究残余岩溶强度与储层富集区域的关系,本文用模糊数学评判法对各参数进行综合处理,得到一个反映残余岩溶强度的综合指标,即残余岩溶强度模糊指数。^[1~8]

这里选用孔隙度、渗透率、准残溶率、有效储能指数、有效连通指数、次生灰化指数等6个参数参与评判。其中,准残溶率是指各井的有效厚度与总厚度之比:

$$\eta = \Delta h_i / h_i \quad (1)$$

式中: h_i 为第*i*层的总厚度; Δh_i 为第*i*层的有效厚度。

次生灰化指数主要指云岩经地下水活动发生次生灰岩化的程度,以次生灰化的百分含量($B, \%$)表示。

三、评判步骤^[1~4]

现以长庆气田碳酸盐储集层为例,说明模糊综合评判法的应用。选取Lin2井马五³小层来说明评判过程。Lin2井马五³小层的基本参数为:孔隙度(φ)6.30%,绝对渗透率(K) $0.229 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,准残溶率(η)0.730,有效储能指数(S_γ)28.98 m,有效连通指数(T_γ) $1.443 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$,次生灰化指数

作者简介:李中锋,1976年生,在读博士研究生;现主要从事油气藏工程研究。地址:(102249)北京市昌平区石油大学石油天然气工程学院。电话:(010)89734268,13521906044。E-mail:lizhongfeng1@sina.com

(B)32%。

模糊综合评判可分为两个主要步骤:①单个因素评判;②所有因素综合评判。

1. 建立因素集、评判集和权重集

选出6项因素作为评判因子,并按长庆气田的惯例分为四类,则因素集 U 和评判集 V 分别为(因

素及评判分类见表1):

$$U = (\varphi, K, T_\gamma, S_\gamma, \eta, B)\% \quad (\text{因素集}) \quad (2)$$

$$V = (\text{I}, \text{II}, \text{III}, \text{IV}) \quad (\text{评判集}) \quad (3)$$

式中: I 为好的储层; II 为较好储层; III 为能达到工业气流产量的储层; IV 为不能能达到工业气流产量的储层。

表1 因素及评判分类表

分类	孔隙度 (%)	绝对渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	准残溶率	有效储能指数 (m)	有效连通指数 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \cdot \text{m}$)	次生灰化指数 (%)	备注
I	>9.0	>5.0	>0.8	>40	>5.0	>80	纯 I 类的界限
	>7.0	>1.0	>0.6	>20	>2.0	>55	
II	5.0~7.0	0.5~1.0	0.4~0.6	15~20	0.7~2.0	40~55	
III	2.0~5.0	0.2~0.5	0.2~0.4	10~15	0.1~0.7	25~40	
IV	≤ 2.0	≤ 0.2	≤ 0.2	≤ 10	≤ 0.1	≤ 25	纯 IV 类的界限
	0.0	0.0	0	5.0	0.0	0.0	

由于各参数在综合评判分类中所起作用大小不同,所以权数分配也应有所不同。一般来讲,各单因素对储集层分类影响程度实质上是与预测无阻流量、开发效果评价的相关程度有关。相关程度越高,权数越大,反之亦然。为了反映各因素的重要程度,参照油田实际情况,根据权数分配原则,组成3个不同的权数分配的权重集,如表2所示。

表2 权重集

	φ	K	η	S_γ	T_γ	$B(\%)$
A_1	0.1	0.2	0.15	0.2	0.25	0.1
A_2	0.15	0.2	0.15	0.15	0.3	0.05
A_3	0.1	0.25	0.15	0.15	0.25	0.1

2. 确立隶属函数

为了确定各参数分类的隶属函数,经过多次的试算和验证,选用岭形系列曲线作为单因素分类的隶属函数^[4]。储集层性能随所选取单因素数值增大而变好,如表1的 φ, K 等因素都有相同的情况,故其隶属函数的确定方法相同,以 φ 为例,其隶属度函数为:当 $\varphi \leq 2$ 时, $\mu_1 = 0, \mu_2 = 0, \mu_3 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(\varphi-1.0)}{2}, \mu_4 = 0$; 当 $5 \geq \varphi > 2$ 时, $\mu_1 = 0, \mu_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(\varphi-3.5)}{3}, \mu_3 = 1, \mu_4 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(\varphi-3.5)}{3}$; 当 $7 \geq \varphi > 5$ 时, $\mu_1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(\varphi-6)}{2}, \mu_2 = 1, \mu_3 =$

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(\varphi-6)}{2}, \mu_4 = 0; \text{当 } 9 \geq \varphi > 7 \text{ 时, } \mu_1 = 1, \mu_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(\varphi-8)}{2}, \mu_3 = 0, \mu_4 = 0; \text{当 } \varphi > 9 \text{ 时, } \mu_1 = 1, \mu_2 = 0, \mu_3 = 0, \mu_4 = 0.$$

3. 单因素评判矩阵

单因素评判矩阵是因素集 U 到评判集 V 的模糊关系和变换,是联合所有单因素评判组合而成的,其中单因素评判构成行矩阵,它是任意固定一个单因素,根据其隶属函数求其分类的隶属度。以 Lin2 井为例,可得各参数的隶属度为:当 $\varphi = 6.3$ 时, $\mu_1 = 1(0.727), \mu_2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(\varphi-8)}{2}(1), \mu_3 = 0(0.273), \mu_4 = 0(0)$; 当 $S_\gamma = 28.98$ 时, $\mu_1 = 1(1), \mu_2 = 0(0), \mu_3 = 0(0), \mu_4 = 0(0)$; 当 $K = 0.229$ 时, $\mu_1 = 0(0), \mu_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(K-0.35)}{0.2}(0.023), \mu_3 = 1(1), \mu_4 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(K-0.35)}{0.2}(0.977)$; 当 $T_\gamma = 1.443$ 时, $\mu_1 = 1(1), \mu_2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(\eta-8)}{0.2}(0.356), \mu_3 = 0(1), \mu_4 = 0(0.977)$; 当 $\eta = 0.730$ 时, $\mu_1 = 1(1), \mu_2 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(\eta-8)}{0.2}(0.273), \mu_3 = 0(0), \mu_4 = 0(0)$; 当 $B = 32$ 时, $\mu_1 = 0(0), \mu_2 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(B-32.5)}{15}(0.448), \mu_3 = 1(1), \mu_4 = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi(B-32.5)}{15}(0.552)$ 。括号内的数据为隶属度。

由此可得单因素评判矩阵:

$$R = \begin{matrix} \varphi \\ K \\ \eta \\ S_{\eta} \\ T_{\eta} \\ B \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0.727 & 1 & 0.273 & 0 \\ 0 & 0.023 & 1 & 0.977 \\ 1 & 0.273 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.356 & 0 & 0 \\ 0 & 0.448 & 1 & 0.552 \end{bmatrix} \quad (4)$$

其余样品也可仿此进行。

4. 综合评判

前述的单因素评判矩阵 R 就是因素集 U 到评判集 V 的模糊关系和变换, 给定 U 上的模糊子集, 即权重 A 后, 就可由 A, R 的模糊矩阵复合运算, 最后按最大隶属度判别准则确定其中最大者, 便可得到综合评判结果。仍以 Lin2 井为例, 则有:

$$B_1 = A_1 \circ R \quad (5)$$

把权重集 A_1 和单因素矩阵 R 代入上式, 并进行模糊矩阵的复合运算, 便可求得 B_1 的数值结果, 即

$$B_1 = \begin{matrix} 0.1 \\ 0.2 \\ 0.15 \\ 0.2 \\ 0.25 \\ 0.1 \end{matrix} \begin{matrix} r \\ \\ o \\ \\ \\ \end{matrix} \begin{bmatrix} 0.727 & 1 & 0.273 & 0 \\ 0 & 0.023 & 1 & 0.977 \\ 1 & 0.273 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.356 & 0 & 0 \\ 0 & 0.448 & 1 & 0.552 \end{bmatrix} = \begin{matrix} 0.6727 \\ 0.2415 \\ 0.3273 \\ 0.2506 \end{matrix} \quad (6)$$

由此, 得到了评价指标 B_1 , 为了给出确定的评判结果取 v 中与 $\max_j b_j$ 最为接近的元素 v 作为评判结果, 称为最大隶属度法, 即

$$v = \{v_i : v_i \text{ 最接近于 } \max_j b_j\} \quad (8)$$

按最大隶属度法对 Lin2 井储层综合评判, 因为 $\max_j b_j$ 为 $v_1 = 0.6727$, 所以其为 I 类储层, 而 Lin2 井测试的无阻流量为 $19.14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 为工业气井。但是该方法仅考虑了最大评判指标的贡献, 它的不足之处在于它舍弃了其它指标所提供的信息。

四、评判结果

按上述方法共对 93 口井进行评判, 在所评价的 93 口井中, 用权重集 A_1 评判所得结果为: 43 口井为 I 类, 5 口井为 II 类, 2 口井为 III 类, 43 口井为 IV 类。用 A_2 评判所得结果为: 43 口井为 I 类, 4 口井为 II 类, 3 口井为 III 类, 43 口井为 IV 类。用权重集 A_3 评判所得结果最好, 45 口井为 I 类, 3 口井为 II 类, 2 口

井为 III 类, 43 口井为 IV 类。在渗透率和有效连通指数权重选取较大的情况下, 用 3 个权重集评价结果相差不大, 可见别的参数对评判结果影响相对较小。

选用评判权重集 A_1 作为综合评判权重集, 与各单因素作为主要依据分类结果和孔隙度分类比较, 在所评价的 93 口井中, 60.22% 的井评价结果相同; 与按渗透率分类比较, 93.55% 的井评价结果相同; 与按准残溶率分类比较, 89.25% 的井评价结果相同; 与按有效储能指数分类比较, 81.72% 的井评价结果相同; 与按有效连通指数分类比较, 97.85% 井评价结果相同; 均有 84.52% 的一致率。

五、结 论

笔者选用 $\varphi, K, \eta, S_{\eta}, T_{\eta}, B^0$ 等 6 个参数来定量描述残余岩溶强度模糊指数。在单因素评价的基础上, 对储层进行了综合评价, 结果把储层分为 4 类: I、II 类可靠; III 类能达到工业气流产量; IV 类不能达到工业气流。

从评判结果看, 在渗透率和有效连通指数权重选取较大的情况下, 用 3 个权重集评价结果相差不大, 可见别的参数对评判结果影响相对较小; 运用模糊评判方法对靖边区孔隙性碳酸盐岩储集层进行分类是可行的。

参 考 文 献

- 1 肖位枢. 模糊数学基础及应用. 北京: 航空工业出版社, 1992
- 2 宋晓秋. 模糊数学原理与方法. 江苏徐州: 中国矿业大学出版社, 1999
- 3 肖芳淳, 张效羽, 张鹏等. 模糊分析设计在石油工业中的应用. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 4 张跃. 模糊数学方法及其应用. 北京: 煤炭工业出版社, 1992
- 5 夏日元等. 鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶地貌及天然气富集特征. 石油与天然气地质, 1999; 22(2): 133~136
- 6 马振芳等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系顶部古风化壳特征及其与天然气富集的关系. 石油勘探与开发, 1999; 26(5): 21~25
- 7 郑秀才. 鄂尔多斯盆地主力产气层溶蚀孔洞特征. 江汉石油学院学报, 1998; 20(1): 7~12
- 8 谢庆邦, 贺静. 陕甘宁盆地南部延长组低渗砂岩储层评价. 天然气工业, 1994; 14(3): 16~20

(收稿日期 2004-12-09 编辑 韩晓渝)