

单层剩余油的算法及应用

严 科, 杨少春

(中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061)

摘要: 针对当前陆相储层深度开发油藏剩余油分布零散, 控制因素多, 研究难度大等问题, 提出一种单层剩余油分布研究方法。利用构造、储层非均质性、井网布局、水驱动态等 4 项剩余油控制因素建立模糊数学模型, 根据生产井的单层开发动态资料、新井电测解释资料以及动态监测资料, 定量给出各控制因素对剩余油的隶属度, 通过模糊运算, 求出油藏中各井点单层的剩余油。方法用于胜坨油田一区注聚先导区 1¹ 层, 建立的剩余油综合评价指数分布模型立足于油藏开发实际, 具有较强的可操作性, 可为油藏的开发和调整提供依据。

关键词: 单层剩余油; 控制因素; 模糊数学; 综合评价指数; 胜坨油田

中图分类号: P624.6

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2007)01-0112-05

对陆相储层深度开发油藏剩余油分布影响因素的研究已取得许多研究成果(韩大匡, 1995; 俞启泰, 2000; 林承焰, 2004), 并在油藏实践中得到了验证。但多数研究成果仅从单一因素的角度定性揭示了剩余油分布规律, 不能给出具体的油藏剩余油定量分布模式。在油藏剩余油研究方法上, 主要应用油藏精细描述、数值模拟、油藏工程、神经网络、动静态描述等(刘宝珩等, 2004)。油藏精细描述及油藏数值模拟方法提供定量化剩余油分布模式, 但工作量巨大, 剩余油描述精度受多种条件限制, 并不适合在所有类型油藏开展(赵永胜, 1998); 油藏工程方法只能计算某个小层的剩余油饱和度平均值或剩余油分布的大致区域, 不能确切反映剩余油平面分布的差异性, 在应用上受到限制; 神经网络技术对学习样本的数量和精度要求较高, 具体应用中需要有足够数量的检查井资料(刘波等, 2002)。采用动静态描述的方法定量分析剩余油, 井点剩余油的评价可信度较高, 但由于动态监测资料少, 仍不能全面真实反映油藏剩余油分布规律。

为此, 本文提出根据新井电测解释、动态监测等资料对影响剩余油分布的各项因素进行定量评价, 应用模糊数学理论(韩立岩等, 1989; 杨少春, 2000; 孙孟茹等, 2004, 2005)对各因素进行模糊运算, 求出油藏中各井点剩余油综合评价指数, 定量表征油藏

剩余油分布。

1 剩余油综合评价指数算法

1.1 数学模型

设所考虑的评价因素集合为: $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$, 式中: $U_i (i=1, 2, \dots, m)$ 代表评价因素。

通常选取以下 4 项评价因素, 分别为:

U_1 ——构造位置;

U_2 ——沉积微相类型;

U_3 ——井网布局;

U_4 ——水驱动态;

评语集合为: $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, 式中: $V_j (j=1, 2, \dots, n)$ 为评判级别; n 为整数。

进行评价时, 评语集合 V 用被评价井集合代替, 即: $V = \{\text{井}_1, \text{井}_2, \dots, \text{井}_n\}$

建立一个从 U 到 $F(V)$ 的模糊映射, 即诱导出一个模糊关系矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1m} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nm} \end{bmatrix}$$

其中 γ_{ij} 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 $A = (a_1, a_2, \dots,$

收稿日期: 2006-08-17; 修回日期: 2006-12-23

作者简介: 严科, 男, 1973 年生, 现为中国石油大学(华东)地球资源与信息学院博士研究生, 从事油藏地质研究; E-mail: yankeslof@sina.com.

a_m), 则模糊综合评判方程为: $B = A \circ R$.

式中: \circ 为模糊运算符号; $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 为综合评判结果。其中, b_1, b_2, \dots, b_n 为各井点剩余油综合评价指数。

1.2 单因素矩阵

根据专家知识, 结合研究区实际情况, 确定各评判因素的隶属函数, 建立单因素评判矩阵, 选择的隶属函数有以下两种形式:

1) 离散隶属函数: $\mu(x) = \mu(0, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m, 1)$, 其中 $0 < \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_m < 1$;

2) 连续隶属函数: $\mu(x) = f(x)$ 。

对于构造、沉积相、井网布局等定性指标, 选用离散隶属函数, 应用中针对研究区油藏特点, 根据单采资料、新井多功能解释资料以及动态监测资料综合分析后得出。对于水驱动态定量化指标, 选用连续隶属函数, 通过油藏注采数据的计算求得。

1.3 权重向量的确定

确定权重系数的方法有多种, 较常用的有德尔斐法、专家调查法和判断矩阵法。在实际工作中采用判断矩阵分析法。计算公式如下:

$$b_{ij} = \frac{f_{\mu_j}(\mu_i)}{f_{\mu_i}(\mu_j)} \quad (i, j = 1, 2, \dots, m)$$

式中: $f_{\mu_j}(\mu_i)$ 表示因素 μ_i 相对于因素 μ_j 的重要程度。 $m \times n$ 个 b_{ij} 可组成构造判断矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix}$$

根据构造判断矩阵 B , 计算它的最大特征根及特征向量: $\zeta = (X_1, X_2, \dots, X_m)$

取 X_i 作为因素 μ_i 的重要程度系数 a_i , 即: $A = (X_1, X_2, \dots, X_m) = (a_1, a_2, \dots, a_m)$

1.4 模型计算

模糊综合评判的计算模型有多种, 最常用的主要有 3 种: (1) 主因素决定型 ($M(\wedge, \vee)$); (2) 主因素突出型 ($M(\square, \vee)$) 及 ($M(\wedge, +)$); (3) 加权平均型 ($M(\square, +)$)。剩余油综合评价中, 采用加权平均型进行计算, 即:

$$b_j = \sum_{i=1}^n a_i r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

2 应用实例

2.1 应用区地质概况

胜坨油田一区注聚先导区 1^1 层沉积环境为三角洲平原亚相, 沉积微相包括分流河道、天然堤、决口扇、分支间湾等, 储层非均质性较强。该油藏 1964 年 6 月投产, 1966 年 7 月实施注水开发, 经过 40 多年的开发, 目前已进入特高含水开发后期, 剩余油分布零散, 识别难度较大。

2.2 剩余油控制因素及其隶属度

根据剩余油控制因素研究成果, 结合胜坨油田一区注聚先导区开发实际, 认为控制研究区剩余油分布的主要因素是构造、储层非均质性、井网布局和水驱动态。

应用储层层次分析法将研究区 1^1 层划分为 1^{11} 和 1^{12} 两个砂体, 应用密井网测井资料做出构造模型 (图 1)。按照生产井点在所处注采井区内构造位置的不同, 将构造因素定量表征为 3 种类型: 构造高部位、与水井平行及构造低部位, 不同构造位置对剩余油分布的控制程度不同。

结合沉积微相、成岩相研究, 将 1^{11} , 1^{12} 砂体进一步划分为 4 类流动单元 (图 2)。其中, A 类流动单元储层物性最好, 主要发育在河道砂体轴部, 砂体的原始孔渗性很好, 次生溶蚀作用较强, 分布范围有限, 仅在零星井点分布; B 类流动单元储层物性较好, 主要为河道砂体沉积, 压实作用、高岭石充填成岩作用均较弱; C 类流动单元储层物性中等, 主要为河道及其边缘砂体, 压实成岩作用较弱, 但高岭石充填成岩相发育, 降低了储层的孔渗性; D 类流动单元储层物性较差, 主要为分流河道间沉积, 压实成岩作用普遍较强。不同流动单元具有不同的储层孔渗性及渗流特征, 剩余油分布规律也有所不同。

根据注采井关系, 将油井井网布局分为与水井同井场、主流线、分流线及只采不注等 4 类, 不同类型井网布局对剩余油的控制能力不同。

通过分析油井单采资料、新井电测资料、动态监测资料, 结合储层构造模型、流动单元模型、注采井网布局类型, 计算出各评价因子对剩余油的隶属度 (表 1)。其中, 构造位置剩余油隶属度 = {高部位, 与水井平行, 低部位} = {0.8, 0.6, 0.4}; 流动单元剩余油隶属度 = {A, B, C, D} = {0.1, 0.3, 0.5, 0.65}; 井网模式剩余油隶属度 = {水井同井场, 主流线, 分流线, 只采不注} = {0, 0.3, 0.7, 1.0}。

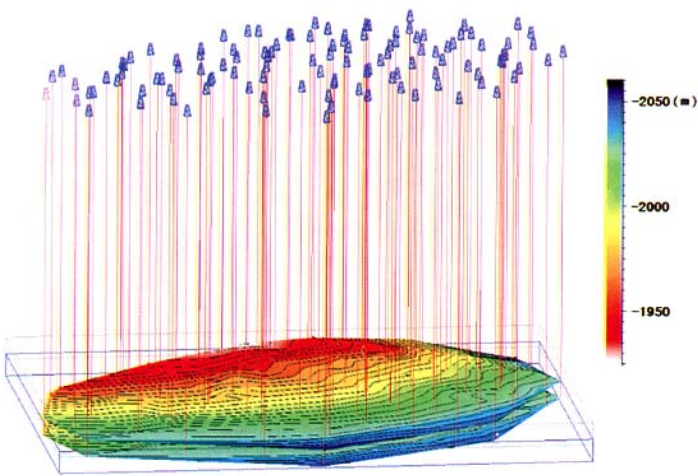


图 1 胜坨油田一区注聚先导区沙二 1'层构造模型
Fig.1 The structural model for the area of interest

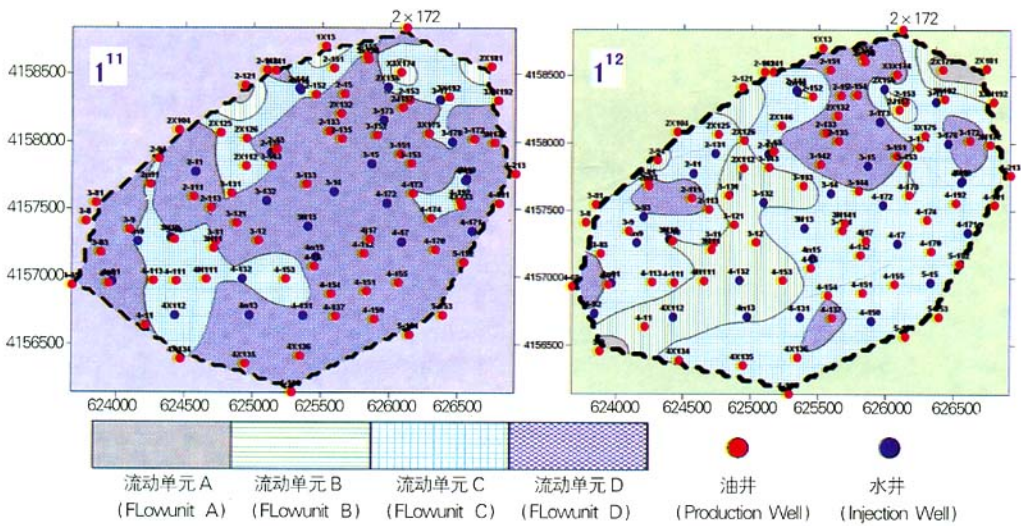


图 2 胜坨油田一区注聚先导区沙二 1'层流动单元模型
Fig.2 The flow unit model for the area of interest

水驱动态属连续隶属函数,对剩余油隶属度的计算分为以下 3 种情况:现状井网注水井井点水淹最为严重,此类井点不参加剩余油综合评价计算,将剩余油综合评价指数直接赋为 0;现状井网油井井点的剩余油富集程度同该井点当前水淹强度有直接

关系,通过计算该井点年度水油比,并使用 $(1/(1 + \text{水油比}))$ 作为该井点水驱动态值;历史注采井点以及油层未射开的井点,使用其所处井区当前的 $(1/(1 + \text{水油比}))$ 作为该井点水驱动态值。

表 1 胜一区注聚先导区沙二 1¹层
剩余油控制因素隶属度表

Table 1 The degree of attribution of controlling factors for remaining oil in the area of interest

因素集合	权重系数	评价标志	隶属度
构造位置	0.1	高部位	0.8
		与水井平行	0.6
		低部位	0.4
流动单元	0.15	A	0.1
		B	0.3
		C	0.5
		D	0.65
井网布局	0.25	与水井同井场	0
		主流线	0.3
		分流线	0.7
		只采不注	1.0
水驱动态	0.5	值越小,水淹强度越高	1/(1+水油比)

2.3 剩余油综合评价指数的计算

结合油藏构造模型、流动单元模型、井网布局以及开发动态数据,逐层对研究区 1¹¹,1¹²层中 113 个注采井点的剩余油控制因素进行了运算和赋值,建立了单因素评价矩阵,按照加权平均法计算出每一个井点的剩余油综合评价指数(表 2)。指数大小反映的是在某一井点上剩余油富集概率值的大小,指数越大,剩余油富集的可能性越高。

应用储层建模软件 GOCAD 对各井点剩余油综合评价指数进行了数据分析,并建立了胜一区注聚

表 2 胜一区注聚先导区沙二 1¹¹层剩余油
综合评价表(部分井区)

Table 2 The comprehensive evaluation index of remaining oil in the area of interest (partial well points)

评价因素	井点						
	3-1	12-153	5-151	3-81	5-152	2x181	...
构造位置	0.6	0.6	0.4	0.8	0.4	0.6	...
流动单元	0.65	0.65	0.65	0.65	0.5	0.3	...
井网布局	0	0.3	1	0.7	0.3	0.7	...
水驱动态	0.05	0.1829	0.8492	0.2511	0.123	0.2369	...
剩余油综合评价指数0.18250.32390.81210.47810.25150.3985...							

先导区沙二 1¹¹,1¹²层剩余油综合评价指数分布模型(图 3)。由于该模型的建立是基于对包括油藏开发动态在内的多种剩余油控制因素的综合评价,并且最大限度的应用了新井、动态监测等最新剩余油研究资料,较好地指导了油藏的开发调整。

3 结论

(1)剩余油综合评价指数是定量研究单层剩余油的方法之一,该方法立足于油藏开发实际,综合反映了构造、储层非均质性、井网布局和水驱动态对剩余油分布的影响,可操作性强。

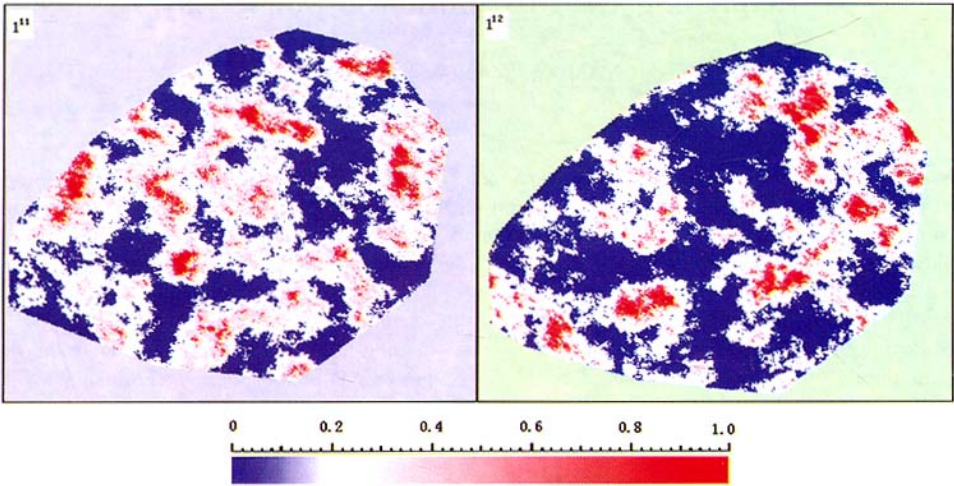


图 3 胜坨油田一区注聚先导区沙二 1¹层剩余油综合评价指数分布图
Fig. 3 Distribution of comprehensive evaluation index of remaining oil in the area of interest

(2)定量研究剩余油的方法具有可操作性,才有效用于生产实际中。

(3)剩余油综合评价指数不是确定性的剩余油富集度表征参数,而是对剩余油高度富集区存在概率的表达。综合评价指数高的井点和井区,剩余油高度富集的可能性大。

参考文献 [References]:

- 韩大匡. 1995. 深度开发高含水油田提高采收率问题的探讨. 石油勘探与开发, 22(5): 47-55.
- Han Dakuang. 1995. An approach to deep development of high water-cut oilfields to improve oil recovery. *Petroleum Exploration and Development*, 22(5): 47-55. (in Chinese with English abstract)
- 韩立岩, 汪培庄. 1989. 应用模糊数学. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 134-166.
- [Han Liyan, Wang Peizhuang. 1989. Applied Fuzzy Mathematics. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 134-166. (in Chinese)]
- 林承焰. 2004. 剩余油形成与分布. 北京: 石油工业出版社, 63-89.
- [Lin Chengyan. 2004. The Formation and Distribution of Remaining Oil. Beijing: Petroleum Industry Press, 63-89. (in Chinese)]
- 刘宝珺, 谢俊, 张金亮. 2004. 我国剩余油技术研究现状与进展. 西北地质, 37(4): 1-6.
- [Liu Baojun, Xie Jun, Zhang Jinliang. 2004. Present situation and advance of remaining oil research technology in China. *Northwestern Geology*, 37(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)]
- 刘波, 杜庆龙, 王良书, 等. 2002. 利用神经网络方法确定薄差层剩余

油的分布. 高校地质学报, 8(2): 199-204.

- [Liu Bo, Du Qinglong, Wang Liangshu, et al. 2002. Determination of remaining oil distribution in thin and poor reservoir by using ANN method. *Geological Journal of China Universities*, 8(2): 199-204. (in Chinese with English abstract)]
- 孙孟茹, 刘文业. 2004. 河流三角洲储层油藏动态模型和剩余油分布. 北京: 石油工业出版社, 37-40.
- [Sun Mengru, Liu Wenye. 2004. The Dynamic Model and Distribution of Remaining Oil in Fluvial and Delta Reservoir. Beijing: Petroleum Industry Press, 37-40. (in Chinese)]
- 孙孟茹. 2005. 基于模糊综合评价的剩余油分布定量描述. 油气地质与采收率, 12(2): 52-54.
- [Sun Mengru. 2005. Quantitative remaining oil distribution based on fuzzy comprehensive discrimination analysis. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 12(2): 52-54. (in Chinese with English abstract)]
- 杨少春. 2000. 储层非均质性定量研究的新方法. 石油大学学报(自然科学版), 24(1): 53-56.
- [Yang Shaochun. 2000. A new method for quantitative study of reservoir heterogeneity. *Journal of the University of Petroleum, China*, 24(1): 53-56. (in Chinese with English abstract)]
- 俞启泰. 2000. 注水油藏大尺度未波及剩余油的三大富集区. 石油学报, 21(2): 45-50.
- [Yu Qitai. 2000. Three major rich areas of "large scale" unswept remaining oil in water flooded bedded sandstone reservoirs. *Acta Petrolei Sinica*, 21(2): 45-50. (in Chinese with English abstract)]
- 赵永胜. 1998. 储层三维地质模型难使数值模拟摆脱困境. 石油学报, 19(3): 135-137.
- [Zhao Yongsheng. 1998. The numerical simulation is difficult to get rid of predicament by 3 Dimensional reservoir model. *Acta Petrolei Sinica*, 19(3): 135-137. (in Chinese)]

The Algorithm and Application of Remaining Oil Distribution in Single Layer

YAN Ke, YANG Shao-chun

(College of Geo-Resources and Information, University of Petroleum, Dongying 257061, China)

Abstract: A new approach for determining the remaining oil distribution in single layer was put forward in view of the various controlling factors, the discrete distribution and the difficulty in discrimination of remaining oil in non-marine mature developed reservoir. Four controlling factors of remaining oil distribution, which include structure, heterogeneity, well pattern and water flood behavior of reservoir, were applied to build a fuzzy mathematic model. The degrees of attribution of all the controlling factors were calibrated by the production performance of single layer wells, the log interpretation of the new drilled wells and the remaining oil saturation monitoring wells. The comprehensive evaluation indexes of individual well points can be obtained to quantitatively characterize the distribution of remaining oil through the fuzzy calculation. The 1st layer, member 2 of the Shahejie Formation in segment 1 of Shengtuo oilfield was taken as an example. It belongs to fluvial reservoir and has been exploited for more than 40 years. The distribution model of comprehensive evaluation indexes was built up, which guilds the development and stimulation treatment satisfactorily.

Key words: remaining oil in single layer; controlling factors; fuzzy mathematics; comprehensive evaluation index; Shengtuo oilfield