

基于模糊聚类分析方法的层系优化研究

冯国庆,潘丽燕,孔冰,罗佳顺

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610500)

摘要:针对H油藏开发现状的不足和剩余油分布规律,应用模糊聚类分析方法和数值模拟技术进行层系优化,对储层的多个影响因素进行评价,最终得到一个综合评价指标,并据此优化层系,以达到减少层间矛盾,提高水驱动用程度的目的。首先,利用灰色关联分析法确定出油藏小层的采出程度、水驱动用程度、含水率、剩余油储量丰度、孔隙度、渗透率变异系数、储层深度、含油面积和渗透率9个特征参数为评价指标,基于模糊聚类分析方法将小层进行重组分类,得到层系优化后的三套方案,每套方案分为两套层系。再利用数值模拟方法预测10年后3套方案的年产油量、采出程度、含水率对比情况,得出最佳方案。实例结果证明了模糊聚类分析方法在层系优化中的实际应用可行性。

关键词:H油藏;层系优化;模糊聚类分析;数值模拟

中图分类号:TE39

文献标识码:A

Hierarchical optimization research based on fuzzy clustering analysis

Feng Guoqing, Pan Liyan, Kong Bing and Luo Jiashun

(State Key Laboratory of Reservoir Geology and Development Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: According to the deficiency of the development status and the distribution law of the remaining oil in the reservoir-H, we used the fuzzy clustering analysis and numerical simulation technique to optimize the layers, evaluated the factors influencing the reservoir, and ultimately, got the comprehensive evaluation index, by which we could optimize the layers to reduce the contradiction between the layers and increase the water drive degree. Firstly, we determined 9 feature parameters as the evaluation indexes by the gray correlation analysis, that is, the water extraction degree, water flooding degree, abundance of remaining oil storage, porosity, variable coefficient of permeability, reservoir depth, oil content, and permeability. Based on the fuzzy clustering analysis, we classified the small layers into three groups. Each set of schemes was divided into two sets of layers. Then, we used the numerical simulation to predict and contrast the annual oil production, recovery, and moisture content of three schemes in 10 years later to get the preferred plan. The experimental results confirmed the feasibility of the fuzzy clustering method in the optimization of the layer system.

Key words: reservoir-H, reservoir optimization, fuzzy cluster analysis, numerical simulation

我国是世界上注水开发油田最多的国家。目前我国许多主力油田中,特别是东部油田,随着油田注水开发的持续进行,越来越多的油田进入高含水时期,层间动用程度差异较大,层系重组则可改善层间的非均质性^[1-3],避免层间干扰,提高采出程度,降低含水率,改善油田的开发效果。

H油藏油层段经过长期的注水开发,目前已处

于高含水开发阶段,由于油藏纵向上非均质性严重,导致剩余油分布多样性。针对H油藏目前的开发现状——地质储量为221.65万吨,单井控制储量高,油藏厚度约200 m,整体跨度较大,油层顶底段1450~1640 m,井段过长;前期整体使用一套井网来开发,引起层间干扰,造成层间矛盾加剧,开采不均衡。

为了改善开发效果,需要对油藏进行开发调

收稿日期:2017-09-01。

第一作者简介:冯国庆(1974—),男,副教授,硕士生导师,油气藏数值模拟、油气藏工程、储层建模、测井资料解释等方向科研和教学工作。
基金项目:国家科技重大专项“低渗—超低渗油藏提高储量动用关键工艺技术”(2017ZX05013-005)。

整。对各层系重新组合,以达到减少层间矛盾,提高水驱动用程度。层系优化方法有模糊聚类分析方法、灰色关联分析法、神经网络算法等,该文使用灰色关联分析法确定评价指标,应用模糊聚类分析方法优化层系,对储层的多个影响因素进行评价,最终得到一个综合评价指标,并据此对储层分类^[4-5]。

1 模糊聚类分析

模糊聚类分析是一种采用模糊数学语言对事物按一定的要求进行描述和分类的数学方法。模糊聚类分析一般是指根据研究对象本身的属性来构造模糊矩阵,并在此基础上根据一定的隶属度来确定聚类关系,即用模糊数学的方法把样本之间的模糊关系定量地确定,从而客观且准确地进行分类^[6]。

1.1 模糊聚类分析基本思想及步骤

设给定论域 U 为有限集合, U 上的一个模糊关系 R ,其对应的模糊矩阵 $R=(r_{ij})_{m \times n}$ 若满足:①自反性 $r_{ij}=1$ ($i=1,2,\dots,n$);②对称性 $r_{ij}=(r_{ji})_{m \times n}$ ($i=1,2,\dots,n$);③传递性 $R \cdot R \subseteq R$,则称 R 是一个模糊等价关系,在矩阵情形称为模糊等价矩阵,只满足①、②称为相似关系^[7]。

1.2 模糊聚类分析的步骤

1.2.1 数据预处理

设论域 $U=\{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}\}$ 被分类为 n 个对象, m 表示每个对象所代表的性状即 $X_i=\{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}\}$ ($i=1,2,\dots,n$),便得到原始的数据矩阵:

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix}$$

1.2.2 数据标准化

在解决实际问题时,需要对原始数据矩阵进行适当的变换,每个特性指标有不同的数量级和不同的单位,无法对其进行比较,要消除这些问题,就要有一个统一的尺度来约束。因此,我们需要运用数据标准化,该文采用平移标准差变与平移极差变换来处理数据。经过标准化处理后,每个特性指标变量的均值为0,标准差为1,并且消除了单位和数量级的影响^[8-9]。

$$x'_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{s_k} (i=1,2,\dots,n; k=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

$$\bar{x}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ik} \quad S_k = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_k)^2} \quad (2)$$

$$x''_{ik} = \frac{x'_{ik} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x'_{ik}\}}{\max_{1 \leq i \leq n} \{x'_{ik}\} - \min_{1 \leq i \leq n} \{x'_{ik}\}} (k=1,2,\dots,m) \quad (3)$$

1.2.3 建立模糊相似矩阵

对于样本空间 $X=[X_{ij}]_{m \times n}$,设 X_{ij} 均已经过标准化规格化处理,该文采用相关系数法,建立样本之间的亲疏关系。

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m |x_{ik} - \bar{x}_i| |x_{jk} - \bar{x}_j|}{\sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}} \quad (4)$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{ik} \quad \bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x_{jk} \quad (5)$$

从而计算出衡量被分类对象 $X_i=\{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{im}\}$ 与 $X_j=\{X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jm}\}$ 间的相似程度 r_{ij} 。当 $r_{ij}=0$ 时,表示样本 X_i 与样本 X_j 毫不相似;当 $r_{ij}=1$ 时,表示样本 X_i 与样本 X_j 完全相同或者等同;当 r_{ij} 就是样本 X_i 自己与自己的相似程度,恒取为1,于是得到一个样本与样本之间的模糊相似关系矩阵^[10]。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.2.4 聚类分析

本文采用聚类分析,用传递闭包聚类法建立起来的模糊关系 $R=(r_{ij})_{m \times n}$,一般来说不具有等价关系,可将它自乘 $R \cdot R = R^2$,再自乘 $R^2 \cdot R^2 = R^4$,如此继续下去,直至某一步出现 $R^k \cdot R^k = R^k$ 为止,则 R^k 便是一个模糊等价关系。对于模糊等价关系 R^k ,则是按不同的水平 λ 进行聚类。

2 模糊聚类分析研究高含水期层系优化

2.1 评价指标的确定

在运用模糊聚类分析进行层系优化前,先采用灰色关联分析方法对各个评价指标进行关联性分

析^[11-12],在层系优化中,采出程度在很大程度上反映着储层的好坏程度。以目前采出程度作为灰色关联分析的母序列,相对其他因素而言,其余的10个指标作为子因素,计算出每个指标对采出程度的关联度,以此确定模糊聚类分析的评价指标。分析结果见表1。

关联度越接近于1,则表明该指标对采出程度影响越大,当关联度大于0.75时,认为该参数具有较好的关联度。通过表1可知,地质储量和有效厚度的关联度低于0.75,则对采出程度的影响较小,即舍去这两个特征参数,选取另外8个关联度大于0.75的特征参数作为聚类分析的指标。利用模糊聚类评价法优化开发层系,将聚类相近的地层划分为一套层系^[13-14]。该文用于模糊聚类参数主要包括孔隙度、渗透率变异系数、含有面积、剩余储量丰度、水驱控制程度、含水率、采出程度、油藏深度、渗透率,主要指标参数见表2。

2.2 聚类结果

根据表2中的结果,综合运用聚类分析算法,将油藏的10个小层的11个评价指标给定不同的置信水平 λ ,随着 λ 的降低,样品由细到粗逐渐归并,按不同的置信水平对10个小层进行模糊聚类,将会得到不同的分类结果。

层系优化需要遵循工艺难度、方案层系尽量简化,有一定的储量规模,层系相对集中,层系优化后油层动用程度大于80%的原则。从表3中可以看

出,当置信水平 λ 取0.925和0.889时,第二套层系的地质储量都较小,当 λ 取0.878时,则第一套层系的地质储量较小,而当置信水平 λ 取0.889、0.886、0.884时,两套层系都有一定地质储量,且层系较为集中,便于层系重组。因此,优选此三套方案。三套方案都在剩余油饱和度和剩余储量丰度高的区域,按两套开发层系进行井网部署,具体层系划分见图1。

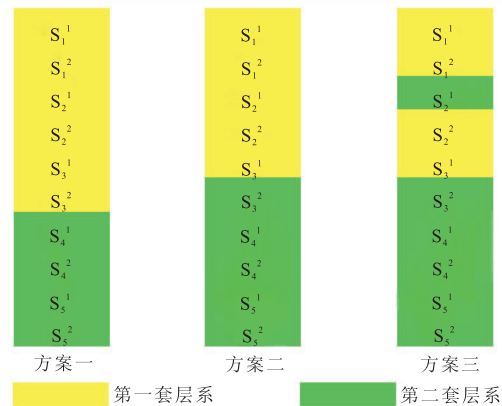


图1 三套方案层系划分

Fig. 1 Layer division diagram of three sets of scheme

3 基于数值模拟研究的层系优化

3.1 层系优化方案

层系优化方案是在基于聚类分析优化层系后的

表1 各指标关联度计算

Table 1 Calculation of correlation degree of each index

地质储量	有效厚度	孔隙度	渗透率变异系数	含油面积	剩余储量丰度	水驱动用程度	含水率	储层深度	渗透率
0.713 3	0.725	0.824 3	0.778 7	0.758 1	0.798 4	0.789 7	0.777	0.805 3	0.827 6

表2 H油藏小层指标统计

Table 2 Indexes of small layer in reservoir-H

层位	孔隙度,%	变异系数	含油面积/km ²	剩余储量丰度/ (10 ⁴ t·km ⁻²)	采出程度,%	水驱动用 程度,%	含水率,%	深度/m	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²
S ₁ ¹	19	1.0	1.44	18.64	3.84	36.7	0.89	1 501	13.5
S ₁ ²	21	1.7	1.72	27.87	19.81	51.6	0.83	1 516	27.5
S ₂ ¹	21	1.9	1.72	28.89	22.96	43.5	0.85	1 533	27.5
S ₂ ²	20	0.5	0.99	25.49	20.62	45.5	0.82	1 548	27.5
S ₃ ¹	20	2.1	1.29	25.86	4.53	42.1	0.77	1 563	32.5
S ₃ ²	20	1.4	1.37	17.86	22.47	46.1	0.59	1 578	37.5
S ₄ ¹	19	1.6	1.21	19.73	16.14	42.6	0.77	1 585	35
S ₄ ²	19	0.7	0.66	15.8	18.57	52.9	0.78	1 602	32.5
S ₅ ¹	19	0.8	0.84	13.5	3.65	61.0	0.92	1 618	27.5
S ₅ ²	20	1.3	1.91	37.69	26.25	38.9	0.70	1 634	25

表3 不同置信水平下两套层系划分方案
Table 3 Two sets of strata division schemes under different confidence levels

置信水平	第一套层系		第二套层系		地质特点
	划分	地质储量/10 ⁴ t	划分	地质储量/10 ⁴ t	
$\lambda=0.925$	$S_1^1 \sim S_4^1, S_5^2$	205.08	S_4^2, S_5^1	16.75	第二套地质储量较小
$\lambda=0.899$	$S_1^1 \sim S_4^1$	164.6	S_4^2, S_5^2	48.53	第二套地质储量较小
$\lambda=0.889$	$S_1^1 \sim S_3^2$	146.93	$S_4^1 \sim S_5^2$	74.72	有一定的地质储量,层系集中
$\lambda=0.886$	$S_1^1 \sim S_3^1$	131.23	$S_5^2 \sim S_5^2$	90.42	有一定的地质储量,层系集中
$\lambda=0.884$	$S_1^1, S_1^2, S_2^2, S_3^1$	103.83	$S_2^1, S_3^2 \sim S_3^2$	117.82	有一定的地质储量,层系比较集中
$\lambda=0.878$	S_1^2, S_2^2, S_3^1	75.45	$S_1^1, S_2^1, S_3^2 \sim S_3^2$	146.2	第一套地质储量较小

三套方案的基础上,进一步开展数值模拟研究^[15-16],根据油气水分布特点,结合剩余油饱和度和剩余储量丰度分布,进行井网加密调整^[17-20],得到综合调整方案F1、F2、F3。三套方案都按两套层系分别为上套井网和下套井网的井位部署,目前井网规则性差,整体难以形成规则的开发井网,因此,采用“局部规则,整体控制”的思想,在平面发育稳定的较大区域采用不规则反七点井网进行部署。图2为井位部署图,共部署新油井31口,其中合采井4口,新水井17口,最终形成21注43采的注采井网,注采井数比约1:2。其中第一套层系共部署新油井17口,新水井8口,第二套层系共部署新油井19口,新水井10口。平面上井

网加密调整的基础上,完善注采井网,纵向上同时考虑层系优化,在完善注采井网的同时,减少层间干扰,最大程度提高砂体动用程度。

3.2 方案对比结果

应用数值模拟方法,预测10年,3套方案的预测年产量、采出程度、含水率对比情况,结果如图3~5所示。

从图3~5可以看出,3个方案中,综合调整方案

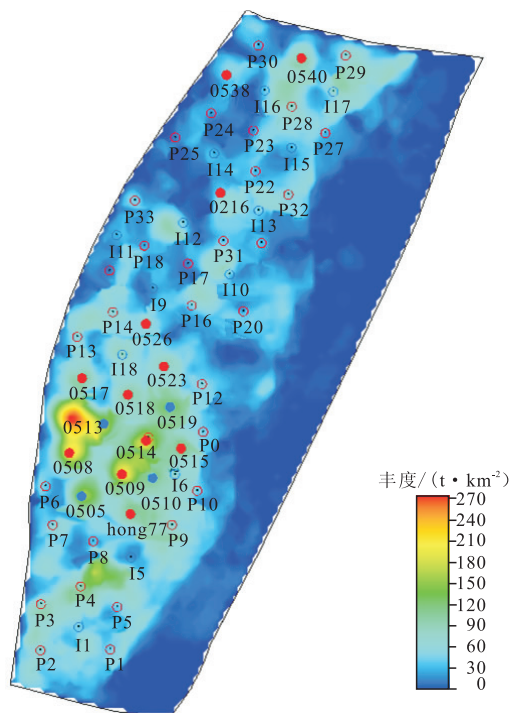


图2 井位部署图

Fig. 2 Deployment of well location

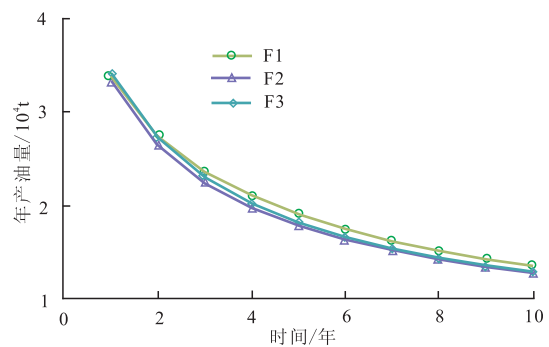


图3 不同方案年产量预测对比曲线

Fig. 3 Comparison of annual oil production forecast in different schemes

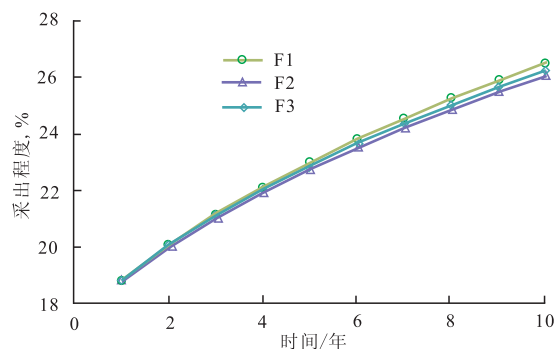


图4 不同方案采出程度预测对比曲线

Fig. 4 Comparison of recovery degree forecast in different schemes

表4 各方案指标对比
Table 4 Comparison of indicators in different schemes

方案	层系号	地质储量/10 ⁴ t	累产油/10 ⁴ t	目前采出程度,%	方案采出程度,%	提高采出程度,%	单井控制储量/10 ⁴ t
F1	第一套	146.93	36.35	15.25	24.74	9.49	6.12
	第二套	74.72	21.55	20.44	28.84	8.40	3.40
F2	第一套	131.23	30.95	14.39	23.59	9.20	5.47
	第二套	90.42	25.89	20.79	28.63	7.84	4.11
F3	第一套	104.11	24.34	12.59	23.38	10.79	4.34
	第二套	118	33.50	21.30	28.39	7.09	5.36

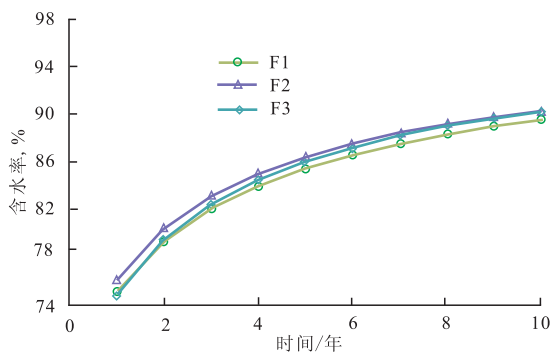


图5 不同方案含水率预测对比曲线

Fig. 5 Comparison of water content forecast in different schemes

由于新钻了31口生产井,注采井网进一步完善,同时对层系进行了优化,减少了层间干扰,预测初期年产量有了显著的提升,预测期末,3套综合调整方案采出程度均超过23.00%,因此开发效果均较好。通过综合调整方案指标对比表(表4),可以看出综合调整方案1累产油最多且采出程度大,因此F1为最优方案。

4 结论

1) 根据油藏各小层物性资料及剩余储量丰度分布,运用模糊聚类分析方法,对储层物性相近的层进行层系优化,初步确定将油藏划分2套开发层系进行开发。实例证明,此优化方法是有效的。

2) 在层系优化的基础上,结合各小层剩余油饱和度及剩余储量丰度分布情况,编制了3套井网重构方案,并通过数值模拟对不同方案进行指标预测,优选出综合调整方案1为最佳方案,实例应用结果表明该层系优化体系具有较高的综合性和科学性,对于油藏开发具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 王明,杜利,国殿斌,等. 层间非均质大型平面模型水驱波及系数室内实验研究[J]. 石油实验地质, 2013, 35(6): 698-701.
- [2] 陈培元,谭秀成,杨辉廷,等. 礁滩型储层层间非均质性定量表征[J]. 岩性油气藏, 2013, 25(4): 27-32.
- [3] 李波,罗宪波,刘英,等. 判断层间非均质性的新方法[J]. 中国海上油气, 2007, 19(2): 93-95.
- [4] 吴胜和,熊琦华. 油气储层地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 1998: 113-128.
- [5] 于志钧,赵旭东. 石油数学地质[M]. 北京:石油工业出版社, 1986: 50-60.
- [6] 肖冬荣,曹征军,康凯. 模糊聚类分析方法在稠油开采中的应用[J]. 微计算机信息, 2010, 26(1): 201-202.
- [7] 刘育骥,耿新宇,肖辞源. 石油工程模糊数学[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1994.
- [8] 冯国庆,张烈辉,沈勇伟,等. 应用模糊聚类分析方法评价油藏质量[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2004, 26(3): 33-36.
- [9] Liu G F, Hou R, Li S S, et al. Production Characteristics Study of Tight Gas Reservoir with Network Fracturing Using Numerical Simulation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3547(675-677): 1556-1560.
- [10] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海:上海科技出版社, 1983.
- [11] 于萍,李克. 使用Microsoft Excel进行数据的灰关联分析[J]. 微型电脑应用, 2011, 27(3): 29-30.
- [12] Zhang Z X, Kang X F, Zhang F F. Application of grey theory for oil and gas reservoir evaluation program optimization[J]. Advanced Materials Research, 2013, 2117(616-618): 1008-1012.
- [13] 郑俊峰,金丽琼,靳晓军,等. 宝浪油田宝北区块低渗透油藏层系优化研究[J]. 河南石油, 2003, 17(1): 38-41.
- [14] 张立秋. 南二区东部二类油层上返层系组合优化[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 116-120.
- [15] 杨二龙,王景翠,高玉鑫. 杏南开发区含钙特低渗透储层井

(下转第39页)