石油与天然气地质
第 24 卷　第 2 期　　OIL & GAS GEOLOGY　　2003 年 6 月

文章编号: 0253- 9985(2003) 02- 0175- 05

剩余油分布研究新方法
——灰色关联法*

李胜利[1,2], 于兴河[1], 高兴军[1], 王庆如[3], 梁　卫[3], 周　锦[3]
(1. 中国地质大学, 北京 100083;　2. 辽河油田地质录井公司, 辽宁盘锦 124010;
3. 中国海洋石油南海东部公司研究院, 广东广州 510240)

摘要: 灰色关联法进行剩余油分布研究是一种综合各种动、静态参数(如微相、生产井影响因子等) 的多参数综合评价方法, 而采用改进的多主因子逐级权系数确定方法更易于针对不同油藏特点进行剩余油分布评价。这一方法应分三步进行: 地质静态研究、生产动态分析、灰色关联综合评分。采用灰色关联法对西江 30- 2 油田 HB 油藏进行剩余油分布评价, 与实际生产吻合较好。

关键词: 剩余油分布; 灰色关联法; 微相
第一作者简介: 李胜利, 男, 32 岁, 博士研究生, 储层地质
中图分类号: TE313. 7　　文献标识码: A

1　原理

灰色理论是指既含已知又含未知的分析方法或系统[1]。这一理论在众多领域(包括地质学) 中有较广泛的应用。而灰色关联分析法是灰色理论中的重要内容, 它是根据系统各因素间或各系统行为间发展态势的相似或相异程度, 来衡量关联程度的方法[2], 它是灰色系统分析、预测、决策的基础。灰色关联分析包括母序列与子系列的选定、关联系数、关联度、关联序和关联矩阵的计算等。在开发地质阶段, 灰色关联度分析方法在储层研究的许多方面都有应用, 包括对储层物性[3]、储层产能[4]、储层中的小层对比技术[5]等, 甚至有些学者用这种方法进行油藏中的来水方向分析[6]。

灰色理论用于剩余油分布研究本质上就是多参数综合评价, 所用资料为静态储层资料与动态生产或测试资料, 并以灰色关联法为核心确定主控因子、进行因子关联分析、综合评估剩余油相对分布。灰色关联法的核心内容是权系数的确定, 合适的各因子权系数的大小直接影响剩余油的相对分布。

1.1　常规的权系数确定

权系数的确定是综合评价事物客观特征过程中的一个重要难题, 通常情况下, 多采用专家打分的方法, 但这种方法人为因素影响太大。为了减少人为因素对评价结果的影响, 采用灰色关联法确定评价指标权系数是一种有益的方法。

各子因素对母因素之间的关联度, 可以由下式得出

$$r_{i,0} = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} L_t(i,0) \qquad (1)$$

式中　$r_{i,0}$为关联度, $L_t(i,0)$ 为母序列与子序列的关联系数。

可见, 关联度是一个取值范围为 0. 1~ 1 之间有界的数。子因素与母因素之间的关联度越接近 1, 表明它们之间的关系越紧密, 或者说该子因素对母因素的影响愈大; 反之关系越松散, 对母因素的影响愈小。

而各因子权系数由式 2 得到, 实际上为各项关联度与其总和之比。

$$\alpha_i = r_{i,0} \Big/ \sum_{t=0}^{m} r_{i,0} \qquad (2)$$

式中　α_i 为权系数

1.2　改进后的权系数计算

由常规的灰色理论权系数确定可以看出, 它是由一个主因子为基础进行权系数分配, 这就必须要求主因子与其他因子相关性相对较好, 否则评价效果不好。这种方法在静态储层质量评价中取得了一定效果, 但它并不能满足动、静态资料结合进行剩余油评分的要求。因为首要主因子可能与其余因子关系不紧密, 正如一个公司的总经理

*　国家自然科学基金, 编号: 40242015
收稿日期: 2002- 11- 09

与下属低级别职员工作关系不紧密一样。同样,第二个主因子也可能存在这样的影响。为此,本文提出一种改进的多主因子逐级选择权系数确定方法。在动、静态资料结合评价剩余油时,产量影响是首要的,但由于其主要受生产制度制约,虽然其为主因子,但其与别的因子相关性可能并不强,所以应该接着选择第二个主因子。第二个主因子可能也存在首要主因子的情况,比如沉积微相,虽然从理论上与成因上它应该与其余因子相关性较大,但从定量上,它是很难与别的因子作对比。我们虽可以做到将各沉积微相之间的差距拉开,却很难让其与其他定量参数足够相关。理论上讲,以上述方法可以对各个参数逐级排序,但实际上这种做法事倍功半。因此,应有效地依各层具体情况确定对剩余油分布的主要因子,并对这几个主要因子,逐级采用灰色关联法确定其权系数。以最后一个主因子与其他非主因子的关联度来计算非主因子的权系数。每计算完一个主因子权重后,就去掉这个主因子,用其他因子再计算剩余因子中主因子的权重,以此类推。这样一种算法是基于一种人性化的管理方法,隐含存在一种假定,即认为最后一个主因子与非主因子的相关性最好,这正如公司中普通职员与最低级别的管理者工作关系最紧密一样。

这种权系数确定方法的计算公式如式 3

$$\begin{cases} \alpha_i = r_{i,0} \Big/ \sum_{i=0}^{m} r_{i,0} & k = 0 \\ \alpha_i = \left(1 - \sum_{j=1}^{k} r_{i,0}\right) r_{i,0} \Big/ \sum_{i=k+1}^{m} r_{i,0} & \\ i = k+1; K = 2, \cdots\cdots, m; k > 0 & \end{cases} \quad (3)$$

我们可以不论这种方法是否一定合理,但这种方法确实可以把那些对剩余油影响的主因子突出,尤其是当我们能够定性地认知某些参数对特定油藏影响时,这种方法就更为有效,因为我们确实不能只认为某一、两个主因子对剩余油分布起决定性作用,而且动态的资料可能并不能很好反映静态地质因素。这也许就是动、静结合进行剩余油评价的特点。

1.3 综合得分的计算

首先以各参数对剩余油的影响做自身评分,每个参数都要标准化。针对不同参数,标准化方法各有不同,主要分 3 种情况:一是定性参数,这种参数按对剩余油的影响以 0~ 1 进行均一分配;二是值越大越有利的因子,标准化的方法如式 4;三是值越小越有利的因子,标准化的方法如式 5。这样严格定量化的参数计算出的结果值都是越大越有利,而非严格化的定性参数依各自情况而定(表 1)。

$$X_{标准} = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min}) \quad (4)$$

$$X_{标准} = (X_{max} - X) / (X_{max} - X_{min}) \quad (5)$$

以各参数自身评分与各参数的权系数相乘可得各参数单项得分,把各参数单项得分累积后以百分制可得最终的单井综合得分,计算方法如式 6

$$W_i = \sum_{j=0}^{m} \alpha_j X_{标准_j} \qquad i = 1, 2, \cdots\cdots, n \quad (6)$$

须指出的是:由于参与评价的参数较多,数学平均值总体可能不会太高,但的确可以反映各井剩余油分布的相对大小。

2 实施步骤

剩余油的分布受静态地质情况与动态生产方案控制,因而综合评价体系应尽可能包括更多的动、静态参数。

2.1 静态参数

油藏油水分布与开发过程中的动态变化直接受控于各项静态储层参数。从成因角度看,沉积作用、可容纳空间变化影响沉积微相的展布;而微相的分布直接影响储层的孔、渗性能、砂体叠置及连通情况,从而影响储层非均质性(包括韵律、隔、夹层、渗透率变化等)。从静态上考虑,在分析剩余油分布时,应综合以上分析的几种要素,而不是单一用一种指标进行分析。具体分析过程为:(1)确定各井初始油水界面,并配合构造图,确定当时各井该油藏构造位置与油水界面的上、下位置关系;(2)确定各砂体沉积微相类型;(3)确定夹层主要分布范围,同时确定油水界面与主要夹层(能起到良好分隔的夹层)的上、下位置关系;(4)确定该井处砂体微相类型及韵律特点,尤其是高渗透率的位置;(5)同一种成因(微相)砂体分析其非均质性能;(6)确定各油层流动单元分布情况;(7)综合分析与评估。在此基础上,对静态参数进行量化。

2.2 动态参数

动态分析方法主要依据生产井动态产油产水与含水率资料、PLT(生产测试)资料、测井解释水

淹与未水淹资料以及相关测试分析资料, 并结合静态地质情况, 对各油藏目前总体水淹状况、主要来水方向及剩余油的有利区块做出一些定性判断。动态分析也要结合油藏边、底水特征, 具体情况具体分析。在此基础上, 对动态参数进行量化。

2.3　综合评分

以选定的动、静态评价参数为基础, 按改进的灰色关联法进行各因子权系数确定, 从而综合确定油藏中剩余油的相对分布。

3　实例

以西江 30- 2 油田为例, 选择微相、构造因素(砂顶距油水界面距离 D)、夹层厚度(T)、夹层频率(f)、生产井影响因子(ENP)、流动单元指数(FZI)、流线及来水方向影响、各井距油水边界距离、孔隙度(POR)、渗透率(K)、以及渗透率变异系数(V_K)、突进系数(S_K)等 12 个因子(表 1), 分别建立边、底水评价体系。边、底水油藏的特点决定了评价体系的不同。边底水油藏底部水力驱动较强, 因而生产井受其自身产量影响较大, 同时由于水从底部推进, 夹层对其有隔阻作用, 因而为加重夹层的影响。在评价体系中, 对夹层厚度、频率都加以考虑, 而对于平面流动起作用的 S_K, 各井距油水边界距离就不加以考虑。而边水油藏受生产井与流动单元孔渗结构影响较大, 边水易出现平面舌进, 因而要考虑各井距油水边界距离, 渗透率突进系数 S_K, 而对夹层选取一个夹层厚度即可。其余各项因子边、底水油藏中都加以考虑, 但各自影响的主要因子不同, 依具体油藏而定。虽然评价剩余油分布参数较多, 但可分两大类来考虑, 即静态参数和动态参数, 每个参数对剩余油的影响各有不同, 而量化方法亦各有不同(表 1)。

表 1　西江 **30- 2** 油田剩余油评价各参数标准化方法表

Table 1　Parameters standardization method to evaluate remaining oil in Xijiang 30-2 oilfield

评价参数(因子)	评分标准及影响因子标准化方法						标准化值对剩余油分布的影响
微　相	分流河道	河口坝	水下分流河道	分流间湾	天然堤/决口扇/远砂坝	席状砂	值越大越有利于剩余油的富集
	0.4	0.8	0.4	1	0.6	0.4	
砂顶与油水界面距离(垂向)	$D=H_{owc}-H_{砂顶}$, H_{owc}为油水界面深度, $H_{砂顶}$为砂顶深度 $D_{标准}=(D-D_{min})/(D_{max}-D_{min})$						值越大越有利于剩余油的富集
夹层厚度	$T_{标准}=(T-T_{min})/(T_{max}-T_{min})$						值越大越有利于剩余油的富集
夹层频率	$F_{标准}=(F-F_{min})/(F_{max}-F_{min})$						值越大越有利于剩余油的富集
流动单元指数	$FZI_{标准}=(FZI_{max}-FZI)/(FZI_{max}-FZI_{min})$						值越大越有利于剩余油的富集
孔隙度	$POR_{标准}=(POR-POR_{min})/(POR_{max}-POR_{min})$						值越大越有利于剩余油的富集
渗透率	$K_{标准}=(K_{max}-K)/(K_{max}-K_{min})$						值越大越有利于剩余油的富集
变异系数	$V_{K标准}=(V_K-V_{Kmin})/(V_{Kmax}-V_{Kmin})$						值越大越有利于剩余油的富集
突进系数	$S_{K标准}=(Sk_{max}-S_K)/(S_{Kmax}-S_{Kmin})$						值越大越有利于剩余油的富集
生产井影响因子	$ENP_{标准}=(ENP_{max}-ENP)/(ENP_{max}-ENP_{min})$						值越大越有利于剩余油的富集
流线影响	强		较强	中等	较弱	弱	值越大越不利于剩余油的富集
	1		0.8	0.6	0.4	0.2	
距油水边界距离(平面)	$Dew_{标准}=(Dew-Dew_{min})/(Dew_{max}-Dew_{min})$ Dew 为各井到油水界面的最近距离						值越大越不利于剩余油的富集

3.1　静态指标量化方法

静态指标的量化主要分定性静态指标的量化与定量指标的量化, 以西江 30- 2 油田为例, 定性指标主要采用沉积微相和流线与来水方向影响两个指标, 定量指标有 10 个之多。对于定性指标, 依据其对井点的影响大小给出相对值, 这种指标因其依据的是相对影响, 其取值范围定在 0.2~ 1, 即影响最强为 1, 较强为 0.8, 中等为 0.6, 较弱为 0.4, 弱为 0.2。对于定量指标依据各自参数的计算方法进行逐井计算, 如夹层厚度、夹层频率、

FZI 、孔隙度 、渗透率 、V_K, S_K 等指标计算方法都有其各自的定义, 这里不再赘述。需要指出的是本文引入的砂顶距油水界面的距离反映了微构造对剩余油的垂向影响, 而边水影响因子指各井距油水边界的距离, 实际上反映了边水对剩余油的平面影响。

3.2 动态指标量化方法

动态上, 生产井对自身及油藏中各井都有影响, 为反映这一影响, 本文提出生产影响因子的概念, 记为 *ENP* 。其计算方法为: 对于给定的井点 *(X, Y)*, 分别计算该点到所有生产井的距离, 记为 L_i(单位: m) , 各生产井累积产油记为 NP_i, i = 1~N(生产井数) 。

定义

$$ENP = \sum_{i=1}^{N} NP_i \times e^{-L_i/L_0} \qquad (7)$$

其中 L_0 为调节因子, 用于调整距离 、生产速度等的影响, 在井距不大的情况下, 一般选 100。

3.3 评价结果

以西江 30-2 油田 HB 油藏为例, HB 层是西江 30-2 油田储量最大的底水油藏, 储层有效厚度大, 因而砂顶距油水界面的距离对剩余油分布可能影响并不大, 而该层沉积微相类型比较丰富, 河道的主流线及来水方向将直接影响其剩余油分布。当然首要的影响因子还是生产井影响因子 *ENP*, 另外 *FZI* 值也应该有较强的影响。以这样的分析为基础选取 *ENP*, 微相, 来水方向及 *FZI* 等 4 个参数为主因子, 其他因子按最后一次计算结果分配权系数, 从计算结果看 *ENP* 与微相所占份额较大(表 2) 。这一计算结果与油田实际生产情况拟合较好(表 2 中得分较高的井与较低的井与生产实际吻合) , 也说明这一方法是可行的。

表 2 西江 **30- 2** 油田 **HB** 油藏剩余油评价参数与得分表

Table 2 Evaluating parameters of remaining oil in HB reservoir, Xijiang 30-2 oilfield

井号	微相 (0.191)	砂顶距离 (0.070)	夹层厚度 (0.047)	夹层频率 (0.058)	流动单元指数 (0.119)	孔隙度 (0.063)	渗透率 (0.060)	变异系数 (0.057)	主流线影响 (0.121)	生产井影响因子 (0.215)	得分
1X	0.8	21.0	1.00	0.039	7.66	26.9	2 138.0	0.613	0.4	4.157	53.61
2X	0.8	14.6	0.00	0.000	5.79	26.0	1 077.0	0.775	0.4	0.597	50.85
B1	0.4	28.0	3.25	0.108	8.74	25.3	2 219.0	0.677	1.0	26.216	38.96
B10	1.0	23.3	2.50	0.095	8.47	27.9	3 000.0	0.882	0.8	30.582	50.73
B11	1.0	21.6	0.00	0.000	8.24	28.6	3 117.0	0.637	1.0	28.083	32.48
B12	1.0	23.4	5.63	0.105	9.98	24.5	2 570.0	0.645	0.2	13.303	70.97
B12ST	1.0	19.8	8.13	0.053	7.47	27.1	2 091.0	0.767	0.2	15.758	76.62
B13	1.0	21.8	4.00	0.056	8.81	26.5	2 675.0	0.683	0.2	12.185	63.06
B14	1.0	21.3	1.25	0.094	8.42	26.2	2 340.0	0.759	1.0	26.217	48.38
B15	0.4	30.0	0.00	0.000	8.11	26.4	2 236.0	0.762	1.0	29.061	43.02
B15ST	0.4	29.9	1.50	0.036	8.46	26.9	2 610.0	0.705	1.0	53.130	25.42
B16	0.4	27.2	2.00	0.036	8.44	27.4	2 780.0	0.535	1.0	20.160	45.53
B17	0.4	21.6	1.60	0.036	8.24	28.7	3 166.1	0.513	0.2	4.114	60.04
B18	0.4	19.2	0.00	0.000	6.77	27.9	1 912.0	0.860	0.2	4.375	62.36
B19	0.4	25.3	1.38	0.043	6.29	26.1	1 290.0	0.665	1.0	9.248	45.66
B2	1.0	21.6	1.25	0.044	10.22	24.7	2 776.0	0.451	0.8	7.361	45.08
B23	0.4	25.8	0.00	0.000	7.57	25.7	1 750.3	1.283	1.0	26.139	44.09
B2ST	0.8	20.8	2.00	0.039	6.11	27.3	1 435.0	0.739	0.6	4.709	58.14
B3	1.0	21.1	3.75	0.052	7.33	24.3	1 345.0	0.659	0.2	8.281	70.31
B4	1.0	24.2	1.63	0.038	7.99	25.5	1 906.0	0.447	1.0	22.198	40.25
B5	1.0	23.0	2.38	0.090	8.51	27.6	2 903.0	0.656	0.6	15.732	52.97
B6	1.0	22.5	1.13	0.044	8.52	27.4	2 834.0	0.596	0.6	9.706	55.91
B7	1.0	26.2	0.00	0.000	8.33	26.2	2 294.0	0.807	1.0	48.799	29.08
B8	1.0	22.5	0.00	0.000	8.28	29.1	3 360.0	0.629	1.0	18.608	37.05
B9	1.0	22.2	5.38	0.052	8.71	26.6	2 651.0	0.492	0.4	12.352	61.07

注: 括号中为权系数; 得分大于 60 的井为有利

参 考 文 献

[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997

5　胡克珍, 吴菊仙, 强超漠. 灰色关联度在小层对比中的应用[J]. 江汉石油学院学报, 1996, 17(3): 35~ 39

6　匡建超, 徐国盛, 王玉兰. 灰色关联度分析在油藏动态描述中的应用[J]. 矿物岩石, 2000, 20(2): 69~ 73

A NEW METHOD FOR STUDYING REMAINING OIL DISTRIBUTION —GREY ASSOCIATION ANALYSIS

Li Shengli[1,2]　Yu Xinghe[1]　Gao Xingjun[1]　Wang Qingru[3]　Liang Wei[3]　Zhou Jin3

(1. China University of Geosciences, Beijing;　2. Geologging Company of Liaohe Oilfield, Panjin, Liaoning;　3. East Institute of South China Sea, CNOOC, Guangzhou, Guangdong)

Abstract: Grey association analysis is a useful method with multiple parameters, i. e. through integrating many dynamic and static parameters, such as micro-facies, production well affecting factor, and etc, to predict remaining oil distribution. Moreover, through the modifying weight coefficient's calculating method with multiple major factors, it is much easier to evaluate remaining oil distribution according to different reservoirs' characteristics. This method can be divided into three steps: first, static geology study; second, dynamic production analysis; and third, synthesis valuation with grey association analysis. With grey association analysis, it is available to evaluate remaining oil distribution on HB reservoir in Xijiang 30-2 oilfield and is consistent with the actual production data.

Key words: remaining oil distribution; grey association analysis; micro-facies

---

(Continued from Page 174)

reservoir sand bodies' prototype-model, the reservoirs' architectural structure of Bashijiqike Fm outcrop can be divided into 6-grade hierarchical interfaces and 6-grade hierarchical entities, and the framework structure is of "building block" pattern. Single sand body occurs generally as tabular mass or wide lens. By contrasting with those in the subsurface, sand bodies in the outcrop area might be a little bit coarser, with higher cement content, and worse reservoir quality. The obvious differences between them might be caused by the epidiagenesis in the outcrop.

Key words: Cretaceous; reservoir characteristics; Bashijiqike Fm; Kuqa depression