

油藏初始流场评价方法研究

刘金华,陈洪才,蔡新明,陈 刚,孙东升
(中国石化江苏油田分公司勘探开发研究院,江苏 扬州 225009)

摘要:江苏油田已整体进入高含水开发阶段,为满足油藏水动力调整需要,研究提出了油藏初始流场的概念,砂岩油藏初始流场定义为油藏在开发初期未经注水等后期改造状态下的潜在流体渗流能力。油藏初始流场研究可对油藏开发后期形成的优势流场与初始流场进行对比,为深入研究剩余油富集规律提供依据。影响油藏初始流场的因素众多,且各因素之间相互影响,采用模糊综合评判法开展定量综合评价,并利用层次分析法评判指标权重。针对江苏油田具体工区,采用重要性、独立性、实用性、全面性等评价指标筛选原则,选择储层非均质性、渗透率、沉积相、裂缝、黏土含量、原油黏度和地层倾角为评价指标,通过指标权重的计算和初始流场强度指数(I)计算,获得了 G6 断块初始流场强度场。

关键词:油藏初始流场;评价方法;层次分析法;流场强度
中图分类号:TE327 **文献标志码:**A

Research on evaluation method of initial flow field in reservoir

LIU Jinhua, CHEN Hongcai, CAI Xinming, CHEN Gang, SUN Dongsheng
(Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield, SINOPEC, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Jiangsu Oilfield has entered the stage of high water-cut development stage as a whole. In order to meet the needs of reservoir hydrodynamic adjustment, the concept of the initial flow field of the reservoir is proposed in this study. The initial flow field of the sandstone reservoir is defined as the potential fluid seepage capacity of the reservoir without water injection in the early stage of development and other post-modification. The study of the initial flow field of the reservoir can compare the dominant flow field formed in the later stage of reservoir development with the initial flow field in the early stage of the reservoir, and provide a basis for in-depth study of the remaining oil enrichment law. Since there are many factors affecting the initial flow field of the reservoir, and the factors affect each other, the fuzzy comprehensive evaluation method is used to carry out quantitative comprehensive evaluation, and the analytic hierarchy process is used to evaluate the index weight. According to the study on the specific work area of Jiangsu Oilfield, the evaluation index screening principles such as importance, independence, practicability, and comprehensiveness are adopted to select reservoir heterogeneity, permeability, sedimentary facies, fracture, clay content, crude oil viscosity, and formation dip angle as evaluation indexes. Through the calculation of index weights and initial flow field intensity index (I), the initial flow field intensity field of G6 Fault Block has been obtained.

Key words: initial flow field of reservoir; evaluation method; analytic hierarchy process; intensity of flow field

前人针对油藏流场或者优势流场的研究已有数十年的历史,油气存储空间和存储流体以及流体在油藏中渗流特征的总称定义为油藏流场,油藏流场是石油、天然气、地层水、注入水等流体在油气存储空间流动的过程,油气存储空间主要包括岩石的孔隙、裂缝、溶洞等^[1-6]。

陈永生于1998年系统总结了油藏流场的特性、影响因素及对剩余油的控制等研究^[1]之后,大量学者对油藏优势流场进行了研究,采用动态关

联法、模糊综合评判法、流线模拟法、试井法等多种方法对优势流场进行识别及评价^[2-5]。现有国内外研究成果多集中于油藏流场评价,特别是优势

收稿日期:2020-04-19;改回日期:2020-06-12。

第一作者简介:刘金华(1981—),博士,高级工程师,现从事石油与天然气地质研究。E-mail:liujinhua.jsyt@sinopec.com。

基金项目:中石化科技攻关项目“复杂小断块岩性油藏提高采收率对策研究”(P19008-1)。

流场评价研究成果较多,主要针对油藏流场存在的目前流场强度(瞬时量)和累积流场强度(累积量)等物理量开展的相关研究^[1-6]。

江苏油田经过40年的开发,含水大于80%的高含水油田储量占全油田动用储量的一半以上,油田整体进入高含水开发阶段。现阶段主力油田已进行过多轮次的细分调整和注采完善,继续细分加密调整的潜力很小,有必要对油藏开展水动力调整,提高注水开发效果。为满足油藏水动力调整需要,本研究提出油藏初始流场,对油藏初始流场评价方法开展研究,将油藏开发后期形成的优势流场与初始流场进行对比,为深入研究剩余油富集规律提供依据。

1 油藏初始流场的概念及研究思路

砂岩油藏初始流场定义为油藏在开发初期油藏未经注水等后期改造状态下的潜在流体渗流能力。通过流场的构造主控因素与储层主控因素分析,以地质主控因素为重点,优选各类油藏主控因素,利用模糊综合评判方法,形成一套油藏初始流场定量表征方法。

流场的强弱由多方面因素造成,且各因素之间相互影响和制约。注水开发油藏的储层非均质性会导致水线推进不均匀,致使剩余油分布不均,或注入水突进使油井暴性水淹,影响开发效果。目前,研究储层非均质性多采用评价单项参数的方法,如评价孔隙度、渗透率变异系数、突进系数等,或者将多个储层参数罗列进行比较。这些方法从不同角度反映了储层非均质性,但存在一些不足:有时多个参数表征不一;衡量多个参数时,加入了更多的人为主观因素。因此有必要对储层非均质性进行深入分析和定量描述。通过流场的构造主控因素与储层主控因素分析,以地质主控因素为重点,优选各类油藏主控因素,形成一套油藏初始流场定量表征方法。

此外,各因素对油藏流场整体的影响和相互关系很难用精确的概念表述,即整个评价过程是非线性的。模糊综合评判法是基于评价过程的非线性特点而提出,是运用模糊数学中的模糊运算法得到量化评价结果的过程^[7-11]。因此,优选模拟综合评判法来进行初始流场的定量表征。

2 综合评判方法原理

模糊综合评判法是用模糊线性变化的数学方

法来评价各指标对评价对象的影响程度,其本质是通过模糊线性变化建立评判矩阵,得到一个模糊集合的评价结果^[11]。

首先选取影响油藏开发效果的因素组成因素集,根据专家意见确定评价其结果的评语集,然后确定各因素对评价结果的权重集。通过试算选取合适的隶属函数,计算评价对象的评判矩阵,通过模糊变换得到评判结果。

(1)确定研究区块各井、各层的研究对象,记为:

$$A=(A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) \quad (1)$$

(2)确定研究对象各属性的集合。如渗透率等参数的集合,记为:

$$P=(P_1, P_2, P_3, \dots, P_m) \quad (2)$$

(3)确定指标矩阵,矩阵元素为属性参数。

$$A = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & \cdots & P_m \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2m} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

A 也可表示为 $A^T=[A_1, A_2, A_3, \dots, A_n]$,其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ a_{31} \\ \vdots \\ a_{m1} \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ a_{32} \\ \vdots \\ a_{m2} \end{bmatrix}, \dots, A_n = \begin{bmatrix} a_{1n} \\ a_{2n} \\ a_{3n} \\ \vdots \\ a_{mn} \end{bmatrix}$$

(4)归一化指标值,元素 a_{ij} 可按下式进行归一化处理为元素 b_{ij} ,给出各评价指标之后,根据最大、最小值方法对各影响因素进行无量纲化处理。

$$b_{ij} = \frac{a_{ij} - \min a_{ij}}{\max a_{ij} - \min a_{ij}} \quad (4)$$

$$b_{ij} = \frac{\max a_{ij} - a_{ij}}{\max a_{ij} - \min a_{ij}} \quad (5)$$

对于正相关的影响因素,如渗透率等采用式(4)进行归一化;对于负相关的参数,采用式(5)进行归一化。归一化后的矩阵为:

$$B = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & \cdots & P_m \\ \begin{matrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \vdots \\ B_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \cdots & b_{1m} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \cdots & b_{2m} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & \cdots & b_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & b_{n3} & \cdots & b_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

(5)权重的确定。给出每个指标对应的权值,

得到权重向量:

$$W=(w_1,w_2,w_3,\cdots,w_m) \tag{7}$$

(6)计算初始流场评价指数 I 。

$$I=BW \tag{8}$$

求得初始流场评价指数向量 $I=(i_1,i_2,i_3,\cdots,i_n)$,其中 $i \in (0,1)$, I 越大,流场越强; I 越小,流场越弱。

3 评判指标权重的确定

确定评判指标权重的方法有层次分析法、统计法、模糊关系方程求解法等几种。本次研究采用层次分析法,其具有简单易操作、理论成熟、自适应性好、计算精度高等优点。

层次分析法(The Analytic Hierarchy Process,简称AHP),是一种定量与定性相结合,将人的主观判断用数量形式表达和处理的方法^[12]。层次分析法由匹兹堡大学的A L Satty教授于1970年代初创立,是将复杂的问题划分为多个层次,再基于客观现实判断,即构造判断矩阵,对每个元素在每个层次的相对重要性进行定量表示。通过求解矩阵的最大特征根和相应的特征向量,确定每一层次元素的相对重要性。

3.1 建立层次结构模型

分析系统中各因素间的关系,定义问题所需的总体目标和影响总体目标的因素,并根据因素间的主导关系建立层次结构模型。

3.2 构造判断矩阵

对每个因素所支配的下层因素进行两两比较,比较它们对上层因素的重要性,并用数字表示,从而构成一个两两判断矩阵。根据研究区块的实际开发经验和专家讨论结果给出两两打分结果,构造判断矩阵。

3.3 计算权向量并做一致性校验

若一致性校验通过,特征向量即为权向量;若一致性校验不通过,需重新构造对比矩阵。

3.3.1 判断矩阵的一致性

3.3.1.1 判断一致性

如果判断矩阵的每个元素满足 $a_{ik} \times a_{jk} = a_{ij}$,则判断矩阵具有一致性。假设判断矩阵 A ,如果每一列向量具有相同的排序结果,则称 A 为判断一致性矩阵。当判断矩阵具有一致性时,可以认为决策者的思路清晰,判断矩阵合理。

3.3.1.2 局部序传递性矩阵

在正互反矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 中,如果对任意 k ,有

$a_{ik} \geq a_{jk}$ 或 $a_{ik} \leq a_{jk}$,则称 $i、j$ 行元素间存在局部序传递性。由于单一准则决策主要用于选择最优解,因此如果求得右主特征向量的最大分量为 w_i ,且 i 行与其余各行元素存在局部序传递性,则仍接受该判断矩阵。

3.3.2 判断矩阵一致性校验方法

3.3.2.1 列向量归一化

选择最大、最小值方法对各参数进行无量纲处理。

3.3.2.2 求最大特征根(λ_{\max})

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{nw_i} \tag{9}$$

式中: A_i 为 A 的第 i 个元素。

计算一致性指标和相对一致性指标:

$$CI_A = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{10}$$

RI_A 为平均随机一致性指标(见表1)^[12],取决于判断矩阵的阶数^[5], n 为矩阵阶数。

表1 1~10阶矩阵 RI_A 取值										
阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI_A	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

CR_A 为随机一致性比率, $CR_A=CI_A/RI_A$,与0.1比较来判断一致性,若 $CR_A<0.1$,则为一致性。

3.4 由判断矩阵计算相对权重

由判断矩阵计算权重的方法有多种,本次研究用求和法计算。对判断矩阵的列向量归一化,然后将归一化的矩阵的各行求和并归一化列向量。

4 初始流场综合定量评价

4.1 评价指标的选取

根据重要性、独立性、实用性和全面性的原则^[13-14],选取了对初始流场影响明显的储层非均质性、渗透率、沉积相、裂缝、黏土含量、原油黏度和地层倾角为评价指标。

(1)储层非均质性(H):储层非均质性反映砂体的渗透性变化,会导致水线推进不均匀,致使剩余油分布不均,或注入水突进使油井暴性水淹影响开发效果,直接影响着注水油田的水驱开发效果。

(2)渗透率(K):渗透率是油水平面运动的主要因素,也是控制流场分布的主要因素。注水井储层渗透率与注入水流量成正比,渗透率越高注入水流量越大,对储层岩石的冲刷越严重,优势流场也越容易形成。中高渗开发单元不同井点处的渗

透率差异较大,容易在渗透率高的井组间形成优势流场。

(3)沉积相(*S*):沉积环境是储层储集性能的主要影响因素之一,也是最基础的影响因素。如三角洲相中的水下分流河道沉积微相属于有利储层,该类砂体形成于水动力强的地方,受水流改造好,砂岩成熟度高,泥质灰质含量低,储层物性好。而水道侧缘相等沉积相带则属于不利储层,该类砂体形成于水动力条件差的地方,水流作用弱,尤其在浅水平静处,沉积颗粒细,泥质含量高,储层物性差。

(4)微裂缝/压裂缝(*F*):由于实验样品要求,裂缝在孔渗等物性试验中无法体现,但其可以改善储层的连通性和渗透性,控制油井初期产能和油井含水上升规律,在渗流方向上起决定作用。压裂缝在地层中的出现相当于均质地层中出现了一条超高渗透性条带,裂缝导流能力越高,油层非均质性越强。根据裂缝发育程度,分别取值0.8,0.6,0.4,0.2,0。压裂井的压裂层位取值1.0,数值越大,裂缝对初始流场的影响越大。

(5)黏土矿物(*C*):黏土矿物变化对注水开发

的影响主要是由于黏土矿物变化对储层物性产生影响,间接影响油气的采出和注水效率,黏土矿物受注水冲刷易遇水膨胀或者运移,从而改变储层的渗透率及注入水方向。

(6)原油黏度(*V*):原油黏度与油水黏度成正比,原油黏度大,油水黏度比也高,油水在高、低渗透层的渗流能力差异越明显。随着注水量增加,注入水更容易在渗透性高的储层中流动,剩余油在低渗透性储层中难以被波及,从而加剧了油藏流场分布的非均质性。反之,若原油黏度小,油水黏度比也低,储层中注入水驱油效果变好,油藏流场的非均质性也随之变弱。

(7)地层倾角(*D*):江苏油田油藏地层倾角从2.6°到30°均有发育。在地层倾角较大的油藏,重力作用随地层倾角变大逐渐变大,如位于注水井上方的油井比下方的油井见水晚,且见水后含水上升速度慢。

4.2 权重确定

确定不同因素对评价目标参数影响的相对重要程度。对于初始流场评价,7大类地质因素重要性确定结果见表2。

表2 初始流场因素重要性比较定量数据

评价因素	储层非均质性	渗透率	沉积相	裂缝	黏土矿物	原油黏度	地层倾角
储层非均质性	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
渗透率	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00
沉积相	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
裂缝	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00
黏土矿物	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00
原油黏度	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00
地层倾角	0.14	0.17	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00

通过优选因素与评价目标的相关性分析,利用各种因素的相对重要程度,可求得不同因素的归一化权重系数(见表3)。储层非均质性及渗透率占主要因素,其余参数影响相对较小。

表3 影响因素指标及其权重

因素	权重
储层非均质性 <i>H</i>	0.35
渗透率 <i>K</i>	0.24
沉积相 <i>S</i>	0.16
裂缝 <i>F</i>	0.10
黏土矿物 <i>C</i>	0.07
原油黏度 <i>V</i>	0.04
地层倾角 <i>D</i>	0.03

4.3 计算初始流场强度指数(*I*)

通过上述研究选定的7个定量参数的归一化和各个参数的权重研究,得出初始流场强度指数*I*的计算公式:

$$I=0.35H+0.24K+0.16S+0.1F+0.07C+0.07V+0.03D$$

(11)

通过对初始流场强度指数*I*的计算,可以制作各油藏各小层的初始流场平面分布图,得出初始流场强度大小,并与开发后期形成的优势流场分布进行对比,从而预测剩余油分布的有利区带。

根据随机一致性计算方法及其检验标准(随机一致性比率 $CR_A<0.1$),本次研究确定的初始流

场强度权重系数随机一致性比率为0.023 ($CR_A=0.023$),说明初始流场强度权重系数值在合理范围。

根据综合权重可求得各井点层系的初始流场值 I ,例如G6断块某小层为非主力层,初始流场低(见图1),剩余油饱和度高(见图2),初始流场低值区剩余油较富集,初始流场能较好地反映注水的流动和剩余油的分布。

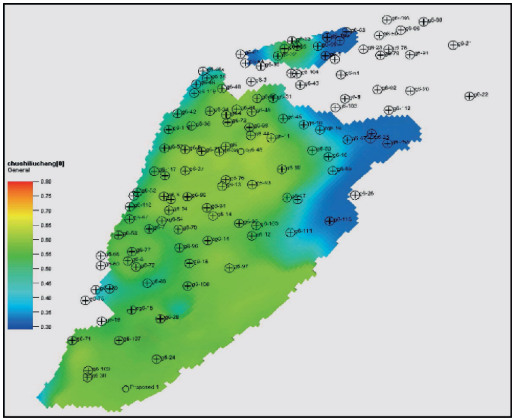


图1 G6断块某小层初始流场分布

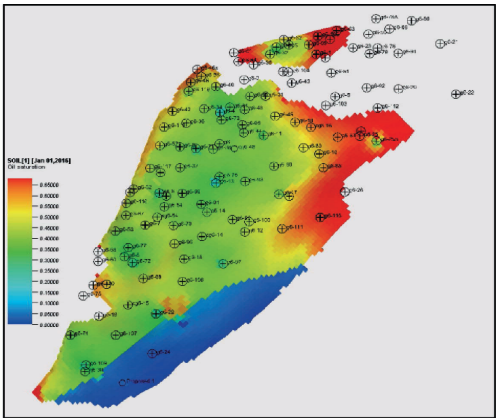


图2 G6断块某小层剩余油饱和度

通过指标体系综合评价结果,结合研究区水淹规律,将初始流场强度指数 I 划分为三类:

I类: $I \geq 0.8$

II类: $0.5 \leq I < 0.8$

III类: $I < 0.5$

I类物性好,水淹程度高,剩余油饱和度低,调剖堵水的潜力相对较大;II类次之,层系细分重组,完善井网的潜力相对较大;III类物性差,含油饱和度高,储层改造的潜力相对较大。

G6-80井19号层位于I类区域,水淹严重,2019年11月重新卡封后日产油从0.2 t上升至4.1 t,含水从99.3%下降至85.6%。

5 结论

(1)砂岩油藏初始流场定义为油藏在开发初

期油藏未经注水等后期改造状态下的潜在流体渗流能力,为满足油藏水动力调整的需要,开展了油藏初始流场定量评价研究。

(2)影响油藏初始流场的因素众多,且各因素间相互影响,采用模糊综合评判法开展定量综合评价,并运用层次分析法评判指标权重。

(3)针对江苏油田具体工区,根据重要性、独立性、实用性和全面性等评价指标筛选原则,选择储层非均质性、渗透率、沉积相、裂缝、黏土含量、原油黏度和地层倾角为评价指标,通过指标权重的计算及初始流场强度指数(I)计算,获得G6断块初始流场强度场。

参考文献:

- [1] 陈永生.油藏流场[M].北京:石油工业出版社,1998.
- [2] 贾俊山.优势流场表征技术[J].断块油气田,2011,18(5):626-629.
- [3] 张乔良,姜瑞忠,姜平,等.油藏流场评价体系的建立及应用[J].大庆石油地质与开发,2014,33(3):86-89.
- [4] 柏明星,张志超,梁健巍.中高渗透砂岩油田优势流场识别与调整[J].油气地质与采收率,2017,24(1):100-105.
- [5] 李阳.陆相断陷湖盆油藏流场宏观参数变化规律及动态模型[J].石油学报,2005,26(2):65-68.
- [6] 高峰.韦8断块优势流场识别与调整实践[J].复杂油气藏,2017,10(4):60-64.
- [7] 欧成华,陈景山.砂体分类评价的模糊综合评判[J].西南石油学院学报,1998,20(3):7-10.
- [8] 刘月田,孙保利,于永生.大孔道模糊识别与定量计算方法[J].石油钻采工艺,2003,25(5):54-59.
- [9] 贾虎,邓力琿.基于流线聚类人工智能方法的水驱油藏流场识别[J].石油勘探与开发,2018,45(2):312-319.
- [10] 辛治国,贾俊山,孙波.优势流场发育阶段定量确定方法研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2012,34(2):119-124.
- [11] 姜瑞忠,王平,候玉培,等.基于BP神经网络的油藏流场评价体系研究[J].断块油气田,2012,19(3):319-322.
- [12] 许树柏.实用决策方法 层次分析法原理[M].天津:天津大学出版社,1988.
- [13] 陈付真,姜汉桥,李杰,等.油藏流场的定量化描述方法及其应用研究[J].石油天然气学报,2011,33(12):111-114.
- [14] 陈民锋,赵梦盼,李晓风,等.基于储层流场分布确定水驱油藏开发潜力[J].复杂油气藏,2013,6(3):40-42,51.

(编辑 谢 葵)