

主成分分析法确定海上油田水驱效果评价关键指标

王敏, 陈民锋*, 刘广为, 赵晶, 时建虎, 盖建
(中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249)

摘要:目前海上油田水驱开发效果评价未形成一套完整、成熟的评价体系及行业标准, 针对海上油田开发特征有必要建立一套可操作性强的水驱效果评价关键指标集。为此, 分析了海上油田和陆上油田水驱开发的差异性和相似性, 构建了以产量、采油速度为核心的海上油田注水开发效果评价常用指标集, 并根据评价指标的独立性、动态性和可操作性进行了初选。最后基于典型海上水驱油田 25 个样本, 应用主成分分析法, 将各评价指标对水驱开发效果的重要程度进行排序, 从储量动用、能量水平、产量变化、水驱状况及水驱效果 5 个方面最终确定 10 个关键指标, 即水驱储量控制程度、水驱储量动用程度、压力保持水平、累积注采比、年注采比、年产油量自然递减率、剩余可采储量采油速度、含水上升率、水驱指数和采出程度。这些指标为科学评价海上油田的水驱效果提供了有利依据。

关键词:海上油田 水驱效果 指标体系 储量动用 能量水平 主成分分析法

中图分类号: TE341

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2015)02-0112-05

Application of principal component analysis on determining the key evaluation indicators of water flooding effects in offshore oilfield

Wang Min, Chen Minfeng, Liu Guangwei, Zhao Jing, Shi Jianhu, Ge Jian

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing City, 102249, China)

Abstract: Water flooding effect evaluation in offshore oilfield has not formed a complete and mature evaluation system and industry standards currently. It is necessary to establish a set of flexible water flooding evaluation system based on the characteristics of offshore oilfield development. Differences and similarities of the water flooding characteristics of the offshore and onshore oilfields were analyzed. A set of commonly used water flooding evaluation indicator system was established focusing on oil production and production rate. Evaluation indicators were primarily selected based on the principle of independence, dynamic and operability. According to 25 samples from the typical offshore water flooding reservoir, importance of these indexes in water flooding evaluation was ranked using method of principal component analysis. Finally, 10 key indicators were screened in aspects of recovery, energy, production, water flooding condition and water flooding effect, which provide favorable guidance for scientific evaluation of the water flooding effect in offshore oilfield. The indicators include control degree and produced degree of the water flooding reserves, pressure support level, cumulative injection-production ratio, yearly injection-production ratio, natural decline rate of yearly oil production, oil production rate of remaining recoverable reserves, raising rate of water cut, water flooding index and recovery degree of reserves.

Key words: offshore oilfield; water flooding effect; indicator system; production of reserves; energy level; principal component analytic approach

油田注水开发效果评价程序一般包括开发效果评价指标筛选、单项指标水平分级以及开发效果

综合评价 3 个方面的内容^[1-3]。目前陆上油田在水驱效果评价方面已经形成了一套完整、成熟的评价

收稿日期: 2015-01-12。

作者简介: 王敏(1989—), 女, 湖北荆州人, 在读硕士研究生, 从事油田开发系统理论方法和三次采油技术研究。联系电话: 18811547010, E-mail: 959404631@qq.com。

*通讯作者: 陈民锋(1971—), 男, 河南清丰人, 博士, 副教授, 从事油田开发系统理论方法和三次采油技术研究。联系电话(010)89733096, E-mail: cmfllp96@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项“西非深水油田注采优化及高效开发模式研究”(2011ZX05030-005-05)。

体系,但是海上油田尚未形成相应的行业标准或企业标准^[4-6],因此有必要针对海上油田的开发特点筛选出适宜的评价指标集,建立一套完整的注水开发效果评价体系。

海上油田与陆上油田注水开发效果评价指标集的选取具有一定的相似性,但是在评价的侧重点上,需要体现出各自的开发特点和要求^[7-9]。笔者针对海上油田的开发特点,围绕产量和采油速度构建了海上油田注水开发效果评价常规指标集(开发技术类),并运用主成分分析法确定关键指标,最终建立了一套海上油田水驱效果评价指标集,以期为海上油田的水驱效果评价提供参考。

1 指标初选

1.1 海上油田与陆上油田水驱开发特征对比

1.1.1 差异性

开发技术和实施条件 陆上油田开发技术和实施条件限制小;海上油田的生产井通常设置在平台、人工岛或海底,需要通过钻定向丛式井来完成,因而不仅钻井、开采技术工艺复杂,新技术实施难度大,投资风险也大。

开发层系及井网部署 陆上油田采取油水井分注分采、细分层系的方式,以直井为主,井网部署相对较密;而海上油田则采取合注合采、局部细分的方式,普遍采用水平井和定向井,井网部署相对较疏。

有效开发时间 陆上油田开发时间相对较长,而海上油田因为海水对平台的腐蚀和昂贵的操作费用,海上平台使用期限一般为20~30 a,导致海上油田的开发具有时效性。

开发动态特点 陆上油田一般将采油速度控制得相对较小,有一定的无水采油期;而海上油田注采强度大,采油速度相对较大,无水采油期短,含水率上升快。

1.1.2 相似性

海上油田与陆上油田储层水驱油渗流机理和油藏工程理论相同,开发技术相似,反映油田开动态和开发效果的指标参数相似。在筛选注水开发效果评价指标时,陆上油田对于海上油田具有很好的借鉴意义。

1.2 海上油田水驱效果评价常规指标集

陆上油田(大庆、胜利、大港、河南等油区)常用水驱效果评价指标集是以产量、采油速度为核心,分别从储量动用、能量水平、产量变化、水驱状况和

水驱效果5个方面来构建^[10-14]。

储量控制和动用评价指标 反映储量动用状况的指标包括水驱储量控制程度、水驱储量动用程度、注采井数比和井网密度等。

能量利用和注采系统评价指标 反映能量水平的指标包括压力保持水平、累积注采比和年注采比等。

产量变化评价指标 反映产量变化的指标包括年产油量自然递减率、年产油量综合递减率、剩余可采储量采油速度、单井日产油增减幅度、采油速度和采液速度等。

水驱状况评价指标 反映水驱状况的指标包括含水率、含水上升率、存水率、耗水率、水驱指数和注水量等。

水驱效果评价指标 反映水驱效果的开发指标包括水驱极限采收率和采出程度。

1.3 评价指标初选

在5大类共25个评价指标中,有些指标不具有独立性、动态性及可操作性,需要进行评价指标初选。

基于指标独立性的初选 水驱效果评价的指标有很多,其中有些指标不具有独立性,必须根据指标间的逻辑关系进行初选。这些指标之间具有因果关系,例如水驱储量控制程度主要受井网密度的影响,井网密度为因,水驱储量控制程度为果,因此井网密度不予保留。同样,注采比主要受注采井数比和注水量控制,因此只保留注采比。

基于指标动态性的初选 评价指标反映油田的开发状况和开发趋势,因此所选指标应该具有一定的动态变化规律。例如受各种增产措施及新井投产影响,年产油量综合递减率无明显变化规律,并不能动态地显示油田水驱效果变化的趋势,因此不予保留;水驱极限采收率为静态指标,且采出程度包含了该指标所反映的信息,因此也不予保留。

基于指标可操作性的初选 评价指标应该具有可操作性,以便统计分析,因此单井日产油量增减幅度不予保留。

2 利用主成分分析法确定关键指标

2.1 主成分分析法的原理及步骤

2.1.1 原理

主成分分析法是利用降维的思路,由研究原始变量相关矩阵内部的依赖关系出发,把一些具有错综复杂关系的变量归结为少数几个综合因子。通

过计算主成分对各评价指标的方差贡献以及主成分的得分系数(即主成分与评价指标间的相关系数),确定各评价指标对于水驱开发效果的相关系数,从而对其重要性进行排序。因此可利用该方法筛选影响海上油田水驱开发效果的关键指标。

2.1.2 步骤

主成分分析法主要分为计算相关系数矩阵、求取协方差矩阵的特征值及相应的正交化单位特征向量、选择主成分、计算主成分载荷和计算主成分得分系数共5个步骤。

协方差矩阵表达式为

$$R = (S_{ij})_{p \times p} \quad (1)$$

$$i = 1, 2, \dots, p$$

$$j = 1, 2, \dots, p$$

其中

$$s_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_i)(x_{kj} - \bar{x}_j) \quad (2)$$

式中: R 为协方差矩阵; S_{ij} 为协方差矩阵中第 i 行和第 j 列所对应的数; i 为行数; j 为列数; p 为矩阵的维数; n 为样本个数; k 为样本变量值; x_{ki} 为第 k 个样本中第 i 个变量的值; \bar{x}_i 为所有样本中第 i 个变量的平均值; x_{kj} 为第 k 个样本中第 j 个变量的值; \bar{x}_j 为所有样本中第 j 个变量的平均值。

选取协方差矩阵的前 m 个较大的特征值,也就是前 m 个主成分对应的方差。某一特征值所对应的单位特征向量就是主成分关于原变量的系数,则原变量的第 i 个主成分为

$$F_i = a_i' X \quad (3)$$

式中: F_i 为所提取的主成分; a_i 为某一特征值所对应的单位特征向量; X 为原变量值。

主成分的方差(信息)贡献率用来反映信息量的大小,其表达式为

$$\alpha_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \quad (4)$$

式中: α_i 为主成分的方差贡献率; λ_i 为第 i 个主成分的特征值; m 为选取协方差矩阵特征值的个数。

主成分的累积方差贡献率表达式为

$$G(m) = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{\sum_{k=1}^n \lambda_k} \quad (5)$$

式中: $G(m)$ 为累积方差贡献率,%; λ_k 为第 k 个主成分的特征值。

当累积方差贡献率大于85%时,就认为能够足够反映原来变量的信息,所对应的 m 就是要抽取的主成分数量。

主成分载荷是反映主成分与原变量之间的相互关联程度,其表达式为

$$l(F_i, X_j) = \sqrt{\lambda_i} a_{ij} \quad (6)$$

式中: l 为主成分载荷; X_j 为原变量; a_{ij} 为各变量间的相关系数矩阵。

计算主成分得分系数的表达式为

$$F_i = a_{1i} X_1 + a_{2i} X_2 + \dots + a_{pi} X_p \quad (7)$$

2.2 关键指标筛选

经初选后剩余15个评价指标,再利用主成分分析法进一步筛选出关键指标。以年度为单位,选取具有代表性的25组样本,计算各评价指标之间的相关系数矩阵(表1)。其中相关系数为负值表示负影响,且绝对值越接近1表示2个指标相关性越高。

方差贡献率反映了每个主成分所包含原始变量的信息量度。由于前3个主成分的累积方差贡献率已经包含了原始变量信息量的85.33%,所以可以确定3个主成分,根据各评价指标对这3个主成分的得分系数,可以评价各评价指标与注水开发效果间的相关性。根据得分系数的大小可以得到各评价指标对水驱开发效果的重要程度由大到小的排序为:采出程度、压力保持水平、水驱储量控制程度、自然递减率、累积注采比、剩余可采储量采油速度、含水上升率、水驱指数、年注采比、水驱储量动用程度、采油速度、综合含水率、存水率、采液速度和耗水率(表2)。

根据排序结果,筛选前10个评价指标作为海上油田水驱效果评价关键指标。同时,根据重要程度可从储量动用、能量水平、产量变化、水驱状况及水驱效果5个方面分别选取水驱储量控制程度(其值越大,表明水驱开发效果越好)、压力保持水平(其值越大,表明能量满足产量要求且状态稳定)、年产量自然递减率(递减幅度越小,水驱效果越好)、含水上升率(控制在理论变化值以内,越小越好)和采出程度(同类油藏参数下,该值越大,效果越好)作为注水开发评价核心指标,其余指标则作为辅助指标,以便再进行具体油田的指标评价时有针对性地使用。最终确定一套操作性和适应性强的海上油田水驱效果评价关键指标集(包括5个核心指标和5个辅助指标),为科学评价海上油田的水驱效果提供了有利依据。

表1 各评价指标的相关系数矩阵
Table1 The correlation coefficient matrix of each evaluation indicator

类 别	储量动用		能 量 水 平			产 量 变 化				水 驱 状 况				水驱效果		
	水驱储量控制程度	水驱储量动用程度	压力保持水平	年注采比	累积注采比	年产油量自然递减率	采液速度	剩余可采储量采油速度	采油速度	综合含水率	含水上升率	存水率	耗水率	水驱指数	采出程度	
储量 动用	水驱储量控制程度	1.000	0.180	-0.156	-0.116	0.223	-0.135	-0.007	-0.130	-0.085	0.125	0.489	-0.088	0.033	0.214	0.076
	水驱储量动用程度	0.180	1.000	-0.160	-0.351	-0.051	-0.082	-0.138	0.050	-0.223	-0.099	0.188	0.114	-0.190	-0.083	-0.140
能量 水平	压力保持水平	-0.156	-0.160	1.000	-0.241	-0.711	-0.370	-0.750	-0.460	-0.550	-0.748	-0.388	0.741	-0.571	-0.639	-0.690
	年注采比	-0.116	-0.351	-0.241	1.000	0.527	0.027	0.644	-0.210	0.743	0.663	-0.025	-0.684	0.789	0.564	0.725
	累积注采比	0.223	-0.051	-0.711	0.527	1.000	0.315	0.838	0.153	0.775	0.948	0.619	-0.921	0.851	0.995	0.909
产量 变化	年产油量自然递减率	-0.135	-0.082	-0.370	0.027	0.315	1.000	0.487	0.854	0.409	0.237	0.209	-0.226	0.128	0.287	0.202
	采液速度	-0.007	-0.138	-0.750	0.644	0.838	0.487	1.000	0.438	0.956	0.930	0.180	-0.939	0.896	0.824	0.931
	剩余可采储量采油速度	-0.130	0.050	-0.460	-0.210	0.153	0.854	0.438	1.000	0.296	0.147	0.001	-0.147	0.007	0.098	0.101
	采油速度	-0.085	-0.223	-0.550	0.743	0.775	0.409	0.956	0.296	1.000	0.890	0.047	-0.910	0.934	0.788	0.925
水驱 状况	综合含水率	0.125	-0.099	-0.748	0.663	0.948	0.237	0.930	0.147	0.890	1.000	0.366	-0.997	0.957	0.942	0.991
	含水上升率	0.489	0.188	-0.388	-0.025	0.619	0.209	0.180	0.001	0.047	0.366	1.000	-0.293	0.162	0.602	0.263
	存水率	-0.088	0.114	0.741	-0.684	-0.921	-0.226	-0.939	-0.147	-0.910	-0.997	-0.293	1.000	-0.970	-0.916	-0.990
	耗水率	0.033	-0.190	-0.571	0.789	0.851	0.128	0.896	0.007	0.934	0.957	0.162	-0.970	1.000	0.867	0.987
	水驱指数	0.214	-0.083	-0.639	0.564	0.995	0.287	0.824	0.098	0.788	0.942	0.602	-0.916	0.867	1.000	0.912
水驱 效果	采出程度	0.076	-0.139	-0.685	0.725	0.909	0.202	0.931	0.101	0.925	0.991	0.263	-0.996	0.987	0.912	1.000

表2 各评价指标对水驱开发效果的得分系数及重要程度排序
Table 2 Variance contribution rate of each principal component

类别	储 量		能 量			产 量				水 驱 状 况				水驱效果	
	水驱储量控制程度	水驱储量动用程度	压力保持水平	年注采比	累积注采比	年产油量自然递减率	采液速度	剩余可采储量采油速度	采油速度	综合含水率	含水上升率	存水率	耗水率	水驱指数	采出程度
相关系数	0.095	0.080	0.101	0.083	0.088	0.095	0.066	0.086	0.076	0.075	0.085	0.074	0.064	0.085	0.102
重要性顺序	3	10	2	9	5	4	14	6	11	12	7	13	15	8	1
指标类别	核心	辅助	核心	辅助	辅助	核心		辅助			核心			辅助	核心

3 结束语

结合陆上水驱油田常用开发技术类评价指标，

建立了海上油田水驱效果评价常规指标集，并基于独立性、动态性和可操作性对评价指标进行初选。以实际开发数据为基础，采用主成分分析法，确定了各评价指标对水驱开发效果的重要程度排序。

最终基于排序结果筛选出10项评价关键指标,其中包括水驱储量控制程度、压力保持水平、年产量自然递减率、含水上升率和采出程度5个核心指标,水驱储量动用程度、年注采比、累积注采比、剩余可采储量采油速度和水驱指数5个辅助指标,可以为科学评价海上油田的水驱效果提供决策依据。同时该方法的应用也使得油田注水开发效果指标集的建立沿着方法科学化和程序规范化的方向发展。

参考文献:

- [1] 姜瑞忠,刘小波,王海江,等.指标综合筛选方法在高含水油田开发效果评价中的应用——以埕东油田为例[J].油气地质与采收率,2008,15(2):99-101,107.
Jiang Ruizhong, Liu Xiaobo, Wang Haijiang, et al. Application of variables synthetical selection in the production effect evaluation for oilfields in high water-cut period [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(2): 99-101, 107.
- [2] 陈民锋,郎兆新,张兴焰.模糊综合评判法评价油田注水开发状况[J].断块油气田,2001,8(2):27-30.
Chen Minfeng, Lang Zhaoxin, Zhang Xingyan. Fuzzy comprehensive evaluation method to evaluate oilfield's water injection development [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2001, 8(2): 27-30.
- [3] 陈民锋,张贤松,余振亭,等.海上油田普通稠油聚合物驱效果分级评价研究[J].复杂油气藏,2012,4(5):43-46.
Chen Minfeng, Zhang Xiansong, Yu Zhenting, et al. Classification evaluation of development effect of heavy oil polymer flooding in offshore oilfield [J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2012, 4(5): 43-46.
- [4] 冯其红,王相,王波,等.非均质水驱油藏开发指标预测方法[J].油气地质与采收率,2014,21(1):36-39.
Feng Qihong, Wang Xiang, Wang Bo, et al. A new method for prediction of heterogeneous reservoir development index by waterflooding [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 36-39.
- [5] 张新征,张烈辉,熊钰,等.高含水油田开发效果评价方法及应用研究[J].大庆石油地质与开发,2005,24(3):48-50.
Zhang Xinzheng, Zhang Liehui, Xiong Yu, et al. Evaluation method and its application in developing high water cut oil field [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(3): 48-50.
- [6] 苑保国.水驱油田特高含水期开发效果评价体系[J].大庆石油地质与开发,2009,28(2):53-58.
Yuan Baoguo. Evaluation system of development effect in ultra-high water cut stage of water flooded oilfield [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2009, 28(2): 53-58.
- [7] 邵绍献.水驱油藏单井可采储量影响因素权重定量研究[J].油气地质与采收率,2011,18(6):78-81,85.
Bing Shaoxian. Quantitative study of factors weight of single well recoverable reserves in water drive reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(6): 78-81, 85.
- [8] 陈民锋,姜汉桥.海上油田不同开发井型合理生产制度研究[J].钻采工艺,2007,30(3):67-71.
Chen Minfeng, Jiang Hanqiao. Reasonable production system determination for different well types in offshore oilfields [J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(3): 67-71.
- [9] 高兴军,宋子齐,程仲平,等.影响砂岩油藏水驱开发效果的综合评价方法[J].石油勘探与开发,2003,30(2):68-69.
Gao Xingjun, Song Ziqi, Chen Zhongping, et al. Geologic factors influencing the water-drive development of sandstone reservoirs and their comprehensive evaluation using Grey System Theory [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(2): 68-69.
- [10] 付永强.砂岩油藏注水开发水驱效果评价指标与方法研究[D].成都:西南石油学院,2000.
Fu Yongqiang. Effect evaluation indexes and method of sandstone reservoirs with water flooding [D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2000.
- [11] 尤启东,周方喜,张建良.复杂小断块油藏水驱开发效果评价方法[J].油气地质与采收率,2009,16(1):78-81.
You Qidong, Zhou Fangxi, Zhang Jianliang. Evaluation procedure of water flooding effect of complicated small fault blocks [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(1): 78-81.
- [12] 孙建平,冉启全,史焕巛.大港油田枣35区块裂缝性火山岩稠油油藏注水开发特征及效果评价[J].油气地质与采收率,2005,12(1):59-62.
Sun Jianping, Ran Qiquan, Shi Huandian. Water-flooding characteristic and effect evaluation of the fractured volcanic heavy oil reservoir of block Zao35 [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(1): 59-62.
- [13] 牛明超.埕岛油田温和注水开发效果评价[J].油气地质与采收率,2006,13(3):71-73.
Niu Mingchao. Effect evaluation of moderate waterflood development in Chengdao Oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(3): 71-73.
- [14] 董双波,闫栋栋,张红静,等.段六拨油田水驱开发效果及产能挖潜对策[J].油气地质与采收率,2011,18(3):86-89.
Dong Shuangbo, Yan Dongdong, Zhang Hongjing, et al. Study on performance of water-flooding development and productivity potential in Duanliubo oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(3): 86-89.

编辑 王星