

文章编号:1009-9603(2021)02-0119-08

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.02.015

# 智能分注分采技术改善水驱开发效果评价方法

罗云龙<sup>1</sup>,卢祥国<sup>1</sup>,曹豹<sup>1</sup>,刘义刚<sup>2</sup>,夏欢<sup>2</sup>

(1.东北石油大学提高油气采收率教育部重点实验室,黑龙江大庆163318;

2.中海石油天津分公司渤海石油研究院,天津300452)

**摘要:**近年来,智能分注分采技术在改善油藏水驱开发效果方面发挥着十分重要作用,为评价该技术改善水驱开发效果程度,考虑储层物性、流体性质、采出程度和开发动态等影响因素,建立了一套量化综合评价方法。首先对油田常用开发效果评价指标进行归纳分类,确定筛选原则并依据逻辑分析法筛选出了9个典型评价指标,再以采收率为目标函数,结合灰色关联分析法和层次分析法,确定各评价指标综合权重,在此基础上,依据油田现有开发水平分级行业标准,建立不同原油黏度和含水阶段下分级制评分标准。计算目标油田智能分注分采技术应用前后综合分值和分差值,该分差值代表智能分注后水驱开发效果改善程度,差值越大,水驱开发改善程度越大,剩余油动用程度越高。数值模拟结果也表明,分差值与增油效果呈正相关。

**关键词:**智能分注分采;水驱;灰色关联分析法;层次分析法;数值模拟;渤海油田

中图分类号:TE341

文献标识码:A

## Evaluation method of intelligent separate injection-production technique for improving water-flooding development effect

LUO Yunlong<sup>1</sup>, LU Xiangguo<sup>1</sup>, CAO Bao<sup>1</sup>, LIU Yigang<sup>2</sup>, XIA Huan<sup>2</sup>

(1.MOE Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery, Northeast Petroleum University, Daqing City,

Heilongjiang Province, 163318, China; 2.Bohai Oilfield Research Institute, Tianjin Branch,

China National Offshore Oilfield Corporation Limited, Tianjin City, 300452, China)

**Abstract:** In recent years, intelligent separate injection-production techniques have been playing a very important role in improving the water-flooding development effect of reservoirs. For the evaluation of the improvement in water-flooding development effect, a set of quantitative comprehensive evaluation method is established considering the influencing factors such as physical properties of reservoirs, fluid properties, recovery, and development performance. Firstly, common evaluation indexes are classified and the selection principle is determined to sort out nine typical evaluation indexes according to the logical analysis method. Then, the comprehensive weights of evaluation indexes are determined through grey relational analysis and analytic hierarchy process with recovery factor taken as the objective function. On this basis, according to the existing industry standards for the grading of oilfield development levels, the grading scoring standards at different crude-oil viscosity and water-cut stages are established. The comprehensive score and score difference before and after the application of the intelligent separate injection-production technique in the target oilfield are calculated. The score difference represents the improvement in water-flooding development effect. A greater score difference means a better improvement in water-flooding development effect and a higher producing degree of the remaining oil. The results of numerical simulation also show that there is a positive correlation between score difference and increased oil production.

**Key words:** intelligent separate injection-production; water-flooding; grey relational analysis; analytic hierarchy process; numerical simulation; Bohai Oilfield

渤海油田具有原油黏度较高、储层厚度较大、非均质性较强、井网井距较大和岩石胶结强度较低

收稿日期:2020-11-09。

作者简介:罗云龙(1994—),男,四川绵阳人,在读硕士研究生,从事提高油气采收率研究。E-mail:lyunlong0212@126.com。

基金项目:中海油有限公司重大科技攻关课题“渤海油田智能分注分采产业化应用效果”(CCL2017TJTZLST0772)。

等特点<sup>[1-3]</sup>。为有效解决层间驱替不均、注入水利用率低的问题,进一步扩大注入水波及体积,提高剩余油动用程度,采取分层注水或分层采油,起到了良好的增油控水效果。油田开发效果评价在油田开发管理、解决生产问题和开发方案调整等方面发挥着重要作用,因此智能分注分采技术改善水驱效果程度如何量化,其作用效果如何评价成为亟待解决的重要问题。

目前,关于水驱开发效果评价方法大致可以分为状态对比法<sup>[4-5]</sup>、模糊综合评判法<sup>[6-8]</sup>、灰色系统理论评价法<sup>[9-11]</sup>、水平分级评价法、系统动态分析法<sup>[12]</sup>和数值模拟评价法<sup>[13]</sup>等6类。每种方法有其优点也有其短处。状态对比法就是将理论值或曲线与实际值或曲线进行对比,根据两者偏离程度进行评价,最为常用的是含水率与采出程度关系曲线,在相同采出程度下,实际含水率高于理论值为差,实际含水率低于理论值则为好,但好差到什么程度无从体现,评价方法也只是定性分析;模糊综合评判法是一种基于模糊数学理论的系统评价方法,应用模糊变换原理和最大隶属度原则,考虑与被评价事物相关的各个因素,对其进行综合评价,该评价方法成熟且被广泛应用,但其评价指标权重受人为因素影响较强,过于主观;灰色系统理论是由邓聚龙<sup>[14]</sup>提出的,该理论随后被许多石油科技工作者逐渐应用于油气藏工程开发评价、措施决策等方面,灰色系统理论本质是一种多因素统计方法,以实际数据为基础,通过灰色关联度来描述各因素间强弱、大小或者次序关系,进而对油田开发效果进行评价或决策,该方法不被人干预,具有一定的客观优越性;水平分级评价法是基于评价指标体系,制定油田开发水平分级标准<sup>[15]</sup>,通过划分评价指标范围,划分为好、中等、差或一、二、三3种类别,但评价结果也只能定性评价且具有一定模糊性;数值模拟评价法是一种较为方便且经济的方法,通过建立地质模型并考虑调整措施机理得出模拟结果,便能直观得出评价结果,虽然外国对数值模拟认可度较高,但由于种种原因,中国仅将数值模拟作为参考,主要原因可能是对地质认识不够全面。

为使评价体系更加完善,权重给定更为合理,水驱开发效果评价更具客观全面性,笔者基于灰色关联分析法和层次分析法确定评价指标综合权重,根据中国石油《油田开发水平分级》(SY/T 6219—1996)<sup>[15]</sup>和中海石油《海上中高渗透率水驱砂岩油藏开发水平分级》<sup>[16]</sup>等行业标准,建立不同原油黏度和含水阶段下分级制评分标准,利用智能分注分

采技术措施前后综合分差值来评价水驱开发效果改善程度,即综合分差值越大,水驱开发效果改善程度就越高,以期为评价渤海油田智能分注分采技术改善水驱开发效果提供技术支持与理论指导。

## 1 评价指标体系构建

### 1.1 评价指标筛选

孙伟通过逻辑分析法、主成分分析法以及灰色关联分析法等方法对评价指标已取得较好的筛选结果,具有重要参考价值<sup>[17]</sup>。鉴于渤海油田实际情况,首先运用油藏工程理论分析油田常用开发效果评价指标的实际意义,并经过分析、整理、归纳和分类,得出评价指标大致可分为生产动态类指标、生产管理类指标和经济效益类指标3大类。由于生产动态类指标直接体现水驱开发效果好坏,生产管理类指标是水驱开发实施过程评价指标,经济效益类指标是水驱开发最终效益结果,因此,对水驱开发效果评价指标筛选只考虑生产动态类指标即可。生产动态类指标可进一步分为开采程度状况、井网完善状况、含水率变化状况、采油量变化状况、注水开发状况、注水利用状况、水驱油效果状况、储采状况和地层能量保持状况等9小类评价指标。

评价指标筛选原则包括:①全面性,所筛选评价指标能全面反映目标油田水驱开发效果。②相对独立性,各评价指标之间应相互独立,避免水驱开发效果的重复评价。③可操作性,评价指标的计算应具有可行性,方便计算分析。④可代表性,评价指标体系应适用范围广且具有代表意义。⑤可对比性,便于措施实施前后开发效果对比。

评价指标筛选采用逻辑分析法。所谓逻辑分析法是根据各评价指标实际意义,分析指标与指标筛选、评价指标与开发效果的逻辑关系。宋子齐将逻辑关系分为:因果关系、等价关系和过程关系<sup>[9]</sup>。

当评价指标间为因果关系时,为体现评价指标的可代表性,应选其“果”。如井网密度越大,水驱储量控制程度越高,因此井网密度和水驱储量控制程度为因果关系,所以选择水驱储量控制程度为评价指标。

当评价指标间为等价关系时,为避免对开发效果的重复评价,可二选一。以反映井网完善状况的水驱储量动用程度和水驱储量控制程度为例,水驱储量动用程度是按年度所有测试水井的吸水剖面或全部测试油井的产液剖面资料计算,即总吸水厚度与注水井总射开连通厚度之比,或总产液厚度与

油井总射开连通厚度之比,水驱储量控制程度定义为在现有井网条件下与注水井连通的采油井射开有效厚度与井组内采油井射开总有效厚度之比,因此两者为等价关系。又如储采比和剩余可采储量采油速度也为等价关系。

当评价指标间为过程关系时,为体现评价指标的相对独立性和代表性,应选其“末”。如综合含水率和综合含水上升率,综合含水上升率是指每采出1%地质储量综合含水率的上升值,两者为过程关系,所以应该选择综合含水上升率为评价指标。

通过对油田常用开发效果评价指标进行归纳分类,遵循筛选原则并运用逻辑分析法,建立了能客观和全面反映油田水驱开发效果的评价指标体系,该体系包括水驱采收率(反映开采程度状况)、水驱储量动用程度(反映井网完善状况)、综合含水上升率(反映含水率变化状况)、单位采油速度综合递减率(反映采油量变化状况)、阶段注采比(反映注水开发状况)、阶段存水率(反映注水利用状况)、阶段水驱指数(反映水驱油效果)、剩余可采储量采油速度(反映储采状况)和能量保持水平(反映地层能量保持状况)共9个评价指标。

## 1.2 评价指标权重确定

目前,权重确定方法大体可分为主观和客观2种。主观方法如德尔菲法、层次分析法和环比评分法等,客观方法如灰色关联分析法和相似权法等方法。对多指标评价系统,若评价指标权重不同,其评价结果就各有差异。因此,确定指标合理权重尤为重要。目前应用较多且成熟的是层次分析法,该法虽然能充分利用决策者在两两比较中给出的偏好进行分析与决策,但单独运用具有明显的主观性。灰色关联分析法虽为一种客观确定权重的方法,但其信息统计具有不完全性,且结果上主要体现的是关联序,因此还需要对系统信息进行补充。综上分析认为,基于灰色关联分析法和层次分析法等主客观观法来确定各项开发评价指标权重,可得到更加科学客观权重结果。

### 1.2.1 灰色关联分析法

#### 1.2.1.1 灰色关联分析法原理

灰色关联分析法是一种以各因素样本数据为依据的多因素统计分析方法,用灰色关联度来描述各因素间相互强弱关系、大小关系或者次序关系。若两因素变化态势基本一致,则它们之间关联度较大,对结果影响就较大,反之则较小。

在灰色关联分析法中, $k$ 时刻母序列与子序列关联系数表达式为:

$$\xi_{oi}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho\Delta_{\max}}{\Delta_{oi}(k) + \rho\Delta_{\max}} \quad (1)$$

若系统因素与系统主行为呈现负相关关系,则可采用倒数化处理方法。若各因素间单位不同,造成数量级或量纲方面差异而无法比较,可在计算关联度前进行无量纲化处理。

两序列关联度可用两比较序列在各个时刻关联系数的平均值计算,其表达式为:

$$r_{oi} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n \xi_{oi}(k) \quad (2)$$

各项指标关联系数确定后,计算其指标权重,其表达式为:

$$\omega_i = \frac{r_{oi}}{\sum_{i=1}^N r_{oi}} \quad (3)$$

#### 1.2.1.2 权重计算

渤海B油田大部分分注井组于2018年9月实施智能分注,截至2019年9月1日该油田各井组智能分注前后9项评价指标值参见表1。由表1可知,B油田各智能分注井组,在实施智能分注技术后,水驱采收率、水驱储量动用程度等评价指标有所改善,综合含水上升率和单位采油速度综合递减率降幅较大,剩余可采储量采油速度仍然较高,能量保持水平稳定。在该评价指标体系中,除个别评价指标外,大多数评价指标有所改善。

以S油田和L油田水驱开发效果评价结果为基础,基于灰色关联分析法原理,计算得到不同油田各评价指标权重。由图1可知,水驱采收率和水驱储量动用程度影响最大,综合含水上升率和单位采油速度综合递减率影响次之,阶段水驱指数、剩余可采储量采油速度和能量保持水平影响较小,阶段注采比和阶段存水率影响最小。

利用渤海B、L和S等油田水驱开发评价指标灰色关联分析法权重计算结果,取其平均值得到渤海油田水驱开发评价指标灰色关联分析法计算最终权重结果。由图1可知,计算所得灰色关联分析法最终权重结果与各油田具有一致特征。值得强调的是,灰色关联分析法权重计算结果是以油田实际生产动态数据为基础,但由于油田开发早期、中期、高含水期和特高含水期实际生产动态的变化,因而会造成权重结果发生变化,即油田在不同时期其评价指标权重不一样。

### 1.2.2 层次分析法

#### 1.2.2.1 层次分析法原理

层次分析法的核心是将决策者对事物的认识

表1 渤海B油田井组评价指标计算结果  
Table1 Calculation results of well-group evaluation indexes in Bohai B Oilfield

井组	评价时期	水驱采收率(%)	水驱储量动用程度(%)	综合含水上升率(%)	单位采油速度综合递减率(%)	阶段注采比	阶段存水率(%)	阶段水驱指数	剩余可采储量采油速度(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /a)	能量保持水平(%)
BZ1	智能分注前	27.31	75.14	14.71	27.54	1.10	39	1.31	6.98	84.74
	智能分注后	28.20	78.17	1.33	22.67	1.53	50	3.29	5.97	82.92
BZ2	智能分注前	28.04	76.78	6.10	43.07	1.67	64	2.70	8.27	92.51
	智能分注后	31.24	77.61	0.80	-49.52	1.80	61	3.76	7.56	92.59
BZ3	智能分注前	30.10	71.62	5.89	35.25	2.15	70	5.21	6.46	89.36
	智能分注后	30.50	72.54	3.89	3.00	1.32	42	2.88	20.07	92.27
BZ4	智能分注前	27.84	81.63	1.08	1.16	1.93	67	3.51	12.28	89.44
	智能分注后	28.14	82.31	0.11	1.31	1.38	49	2.31	14.12	91.35
BZ5	智能分注前	27.32	73.66	3.65	12.81	1.06	31	1.21	10.24	92.21
	智能分注后	30.23	85.12	2.26	-9.46	0.94	21	0.76	10.52	92.31

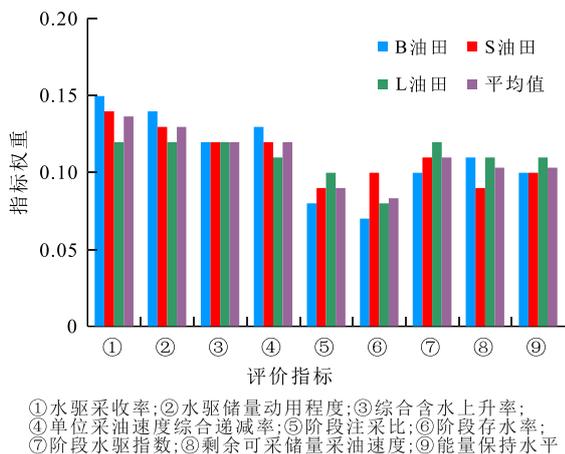


Fig.1 Calculation results of weight by grey relational analysis

经验量化,以增强决策依据的准确性。应用层次分析法确定评价指标的权重,就是建立在有序递阶指标体系基础上,通过比较同一层次各指标相对重

要性来综合计算指标权重。在对指标相对重要性进行评判时,层次分析法引入了九分位比例标度标准参见表2。

表2 相对重要性的比例标度标准  
Table2 Scale of relative importance

甲指标相对乙指标重要程度	极重要	很重要	重要	略重要	同等	次要	极次要
甲指标评价值	9	7	5	3	1	1/3	1/9

层次分析法的步骤主要包括:①构造判断矩阵。②计算权重和最大特征值。③一致性检验。当判断矩阵阶数大于2,其一致性比率小于0.10时,即认为判断矩阵具有满意一致性,否则,需要调整判断矩阵,以使其具有满意一致性。

1.2.2.2 权重计算

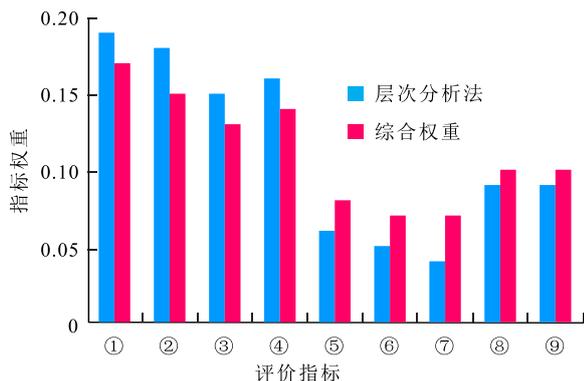
对比各评价指标相对重要性程度,对照比例标度标准得出判断矩阵结果(表3)。

9阶矩阵平均随机一致性指标值为1.46,判断

表3 层次分析法判断矩阵结果  
Table3 Judgment matrix results of weight by analytic hierarchy process

评价值	水驱采收率(%)	水驱储量动用程度(%)	综合含水上升率(%)	单位采油速度综合递减率(%)	阶段注采比	阶段存水率(%)	阶段水驱指数	剩余可采储量采油速度(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /a)	能量保持水平(%)
水驱采收率(%)	1	1	2	2	3	3	3	2	2
水驱储量动用程度(%)	1	1	2	2	2	2	3	2	2
综合含水上升率(%)	0.50	0.50	1	1	3	3	4	2	2
单位采油速度综合递减率(%)	0.50	0.50	1	1	4	4	4	2	2
阶段注采比	0.33	0.50	0.25	0.25	1	1	1	2	1
阶段存水率(%)	0.33	0.50	0.25	0.25	1	1	2	0.33	0.50
阶段水驱指数	0.33	0.25	0.25	0.25	1	0.50	1	0.25	0.33
剩余可采储量采油速度(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> /a)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	3	4	1	1
能量保持水平(%)	0.50	0.50	0.50	0.50	1	2	3	1	1

矩阵的一致性比率为0.038 7,小于0.10,即判断矩阵具有满意的一致性。依据层次分析法原理,计算各评价指标权重,从层次分析法计算结果(图2)来看,水驱采收率、水驱储量动用程度、综合含水上升率、单位采油速度综合递减率和阶段水驱指数等指标影响水驱开发效果改善程度较大,剩余可采储量采油速度和能量保持水平影响次之,阶段存水率和阶段注采比影响较小。



①水驱采收率;②水驱储量动用程度;③综合含水上升率;④单位采油速度综合递减率;⑤阶段注采比;⑥阶段存水率;⑦阶段水驱指数;⑧剩余可采储量采油速度;⑨能量保持水平

图2 层次分析法权重和综合权重计算结果

Fig.2 Calculation results of weight by analytic hierarchy process and comprehensive weight

### 1.2.3 评价指标综合权重

为使评价指标权重计算结果最优,结合灰色关联分析法和层次分析法权重计算结果,引入综合权重,其表达式为:

$$w_i = w_1 + w_2 + \dots + w_n = [\lambda\alpha_1 + (1 - \lambda)\beta_1, \lambda\alpha_2 + (1 - \lambda)\beta_2, \dots, \lambda\alpha_n + (1 - \lambda)\beta_n] \quad (4)$$

若取偏好系数为0.5,水驱开发评价指标的综合权重结果参见图2。

结合灰色关联分析法和层次分析法计算的综合权重结果,作为水驱开发评价指标最终权重。

### 1.3 建立分级制评分标准

在同一含水阶段,各评价指标对智能分注分采改善水驱开发效果程度反映效果不一样,且不同含水阶段各水驱开发效果评价指标变化程度也存在差异。因此,需要根据不同含水阶段对油田建立不同阶段的分级制评分标准。油田划分开发阶段有许多方法,可根据采出程度和含水率等指标划分,大多数油田采用含水率变化作为划分指标,将开发阶段划分为低含水期(含水率 < 20%)、中含水期(含水率为20%~60%)、高含水期(含水率为60%~90%)和特高含水期(含水率 > 90%)等4个阶段。

同时,不同油水黏度比的油田水驱特征也有显

著差异。对于低黏度油田,油水黏度比小,开发初期含水率上升缓慢,主要储量集中在中低含水期采出;对于中高黏度油田,则相反,开发初期含水率上升迅速,主要储量集中在高含水期采出。所以,评分标准的建立还应考虑原油黏度的影响。原油黏度划分为4类:低黏度( $\leq 5 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ )、中高黏度( $5, 50] \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、普稠油 I-1级( $50, 150] \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 和普稠油 I-2级( $150, 10\ 000] \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

依据各开发阶段特征,将开发指标评价标准级别分为三级:好(100分)、中等(0~100分)和差(0分),建立不同原油黏度不同含水阶段下的分级制评分标准。评分标准主要以海上中高渗透率水驱砂岩油藏开发水平分级为基础<sup>[16]</sup>,同时借鉴油田开发水平分级<sup>[15]</sup>等规范和标准,本文仅罗列了原油黏度为5~50 mPa·s的分级评价标准(表4)。

表4 中高渗透砂岩油藏中高黏度开发效果评价标准  
Table4 Evaluation index standards development effect in medium-high permeability sandstone reservoirs with medium-high viscosity oil

评价指标	含水阶段	好	中等	差
水驱采收率		$\geq 35\%$	20%~35%	$\leq 20\%$
水驱储量动用程度		$\geq 75\%$	60%~75%	$\leq 60\%$
能量保持水平		$p \geq p_b$	$p_b > p > 0.85p_b$	$p \leq 0.85p_b$
综合含水上升率	低含水期	$\leq 3.5\%$	3.5%~4.5%	$\geq 4.5\%$
	中含水期	$\leq 4.0\%$	4.0%~5.0%	$\geq 5.0\%$
	高含水期	$\leq 1.5\%$	1.5%~2.5%	$\geq 2.5\%$
	特高含水期	$\leq 1.0\%$	1.0%~1.5%	$\geq 1.5\%$
单位采油速度综合递减率	低含水期	$\leq 4.0\%$	4.0%~6.0%	$\geq 6.0\%$
	中含水期	$\leq 6.0\%$	6.0%~8.0%	$\geq 8.0\%$
	高含水期	$\leq 5.0\%$	5.0%~7.0%	$\geq 7.0\%$
	特高含水期	$\leq 4.0\%$	4.0%~6.0%	$\geq 6.0\%$
阶段注采比		$\geq 0.9$	0.7~0.9	$\leq 0.7$
阶段存水率	低、中含水期	$\geq 60\%$	50%~60%	$\leq 50\%$
	高、特高含水期	$\geq 80\%$	70%~80%	$\leq 70\%$
阶段水驱指数	低、中含水期	$\geq 0.8$	0.4~0.8	$\leq 0.4$
	高、特高含水期	$\geq 1.6$	1.6~1.0	$\leq 1.0$
剩余可采储量采油速度	低含水期	$\geq 5\%$	4%~5%	$\leq 4\%$
	中含水期	$\geq 8\%$	6%~8%	$\leq 6\%$
	高含水期	$\geq 10\%$	8%~10%	$\leq 8\%$
	特高含水期	$\geq 9\%$	7%~9%	$\leq 7\%$

## 2 评价方法

### 2.1 评价步骤

具体评价步骤包括:①运用油藏工程理论,分别计算智能分注分采前后9个评价指标的生产动态

指标值。②基于目标油田平均原油黏度和现阶段含水情况,参照不同原油黏度和不同含水阶段分级制评分标准,计算智能分注前后评价指标分值。③将智能分注分采前后各评价指标分值与各指标综合权重相乘,得到单项评价指标分值,各单项评价指标分值相加即获得该井组综合分值:

$$FZ = \sum_{i=1}^9 y_i w_i \quad (5)$$

④计算智能分注分采前后井组综合分值和分差值,该分差值反映智能分注分采后水驱开发效果改善程度。

## 2.2 评价指标分值计算方法

目前,中国大多数油田水驱开发效果评价都采用好、中等和差等评价等级,不仅评价过程存在较强模糊性,评价步骤也不够合理。例如,水驱储量动用程度仅包括好( $\geq 75\%$ )、中等( $60\% \sim 75\%$ )和差( $\leq 60\%$ )3个等级。假设有甲、乙、丙3个油田,计算甲油田水驱储量动用程度为74%,乙为68%,丙为61%。按照评价标准都处于中等水平,显然评价结论存在不合理性,虽然甲油田处于中等,但评价价值明显趋于好等级;丙油田也处于中等,但评价价值明显趋于差等级。为了改善这种评价方式,更好体现水驱开发效果,拟将好、中等、差3个等级分别赋予分值,好为100分,差为0分,而处于中等级别的则采用线性插值方法计算评价指标对应分值。例如,假设已知坐标 $(x_0, y_0)$ 与 $(x_1, y_1)$ ,要得到 $[x_0, x_1]$ 区间内位置 $x$ 在直线上的值,如图3所示,两点式直线方程表达式为:

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (6)$$

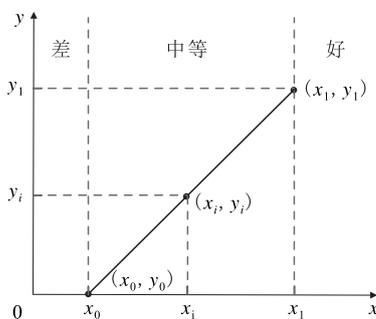


图3 线性插值原理图

Fig.3 Diagram of linear interpolation

以水驱储量动用程度为例,某油田水驱储量动用程度为70%,若评价标准规定水驱储量动用程度大于75%为好,低于60%为差,则该油田水驱开发效果水驱储量动用程度经线性插值得分为67分。

## 2.3 应用实例

渤海B油田构造为一个东北走向的复杂断块,共划分为6个油组,自上而下分别为0, I, II, III, IV和V油组,其中I, II和III为油田的主力油组。油田储集空间以粒间孔为主,平均孔隙度为30%,平均渗透率为1 800 mD,具有高孔高渗透的储集特性。B油田南部主体开发区域截至2019年9月1日共有50口生产井,29口注水井,3口水源井。油田平均地层脱气原油黏度为25 mPa·s,综合含水率约为77%,采出程度约为21%,属于高含水开发阶段。从油田投产到现在,为完善井网、提高储量控制程度和解决层内层间非均质矛盾,先后经历调整和稳产阶段,各开发阶段呈现不同变化规律,该油田分注井组大多于2018年9月1日前后安装智能测调管柱设备。而S油田截至2019年9月1日含水率约为80%,原油黏度为37.4~154.7 mPa·s,所选评价分注井组大多于2018年4月1日前后安装智能测调管柱设备。L油田含水率约为85%,地层原油黏度为13.9~19.4 mPa·s,所选评价智能分注井组大多于2017年5月1日前后下入智能测调管柱设备。截至2019年9月1日,智能分注后各井组生产动态指标发生变化,考虑各井组实际配注层数及分层注水调配次数,各井组评分结果参见表5。从表5可以看出:B油田BZ2和BZ3井组实施智能分注后水驱开发效果提高幅度最大,BZ1和BZ5井组次之,BZ4井组由于本身水驱开发整体效果较优,因此智能分注后未见明显改善;S油田SZ2井组水驱开发效果改善程度较大,SZ3井组次之,SZ1井组再次之;L油田LD1和LD2井组,水驱开发效果均有改善,但改善效果不明显。进一步分析发现,水驱开发效果的改善程度受配注层数及调配次数的影响,配注层数和调配次数越多,相应综合分差值越大,水驱开发效果改善程度越明显,尤其在中低渗透储层注入水利用率增加,扩大波及体积能力增强,使得各层剩余油动用程度提高,最终改善了水驱开发效果。

为进一步体现智能分注分采技术评价方法的适用性,通过B油田实际地质模型,模拟BZ1, BZ2, Z3, BZ4和BZ5等井组5年智能分注开发效果(2019年9月1日至2024年9月1日),并与油水井笼统注采相对比,结果表明(表6):各井组实施智能分注后,其增油量与评价综合分差值呈现正相关关系,即分差值越大增油效果越好,从而进一步证明了该评价方法的适用性。

对于该评价方法本身而言,该评价方法的思路

表5 渤海各油田井组评价情况  
Table5 Evaluation of well groups in Bohai oilfields

油田	井组	配注层数	调配次数	评价时期	综合分值	差值	
B油田	BZ1	6	2	智能分注前	44.91	17.38	
				智能分注后	62.29		
	BZ2	6	2	智能分注前	50.46	29.28	
				智能分注后	79.74		
	BZ3	6	4	智能分注前	48.07	25.37	
				智能分注后	73.44		
	BZ4	5	4	智能分注前	85.89	0.33	
				智能分注后	86.22		
	BZ5	3	4	智能分注前	52.41	19.28	
				智能分注后	71.69		
S油田	SZ1	4	5	智能分注前	54.18	10.11	
				智能分注后	64.29		
	SZ2	4	5	智能分注前	51.18	27.73	
				智能分注后	78.91		
	SZ3	2	5	智能分注前	59.72	15.53	
				智能分注后	75.25		
	L油田	LD1	3	6	智能分注前	30.00	5.11
					智能分注后	35.11	
		LD2	4	5	智能分注前	41.82	5.62
					智能分注后	47.44	

表6 渤海B油田各井组增油结果  
Table6 Increased oil production of well groups in Bohai B Oilfield

井组	产油量(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> )		增油量(m <sup>3</sup> )	综合分差值
	笼统注采	分层注水		
BZ1	44.724 4	44.792 7	683	17.38
BZ2	143.256 1	15.110 35	7 847.4	29.28
BZ3	135.941 3	136.644 6	7 033	25.37
BZ4	14.460 96	14.472 7	117.4	0.33
BZ5	6.083 23	61.380 5	548.2	19.28

具有普遍适用性。从评价对象的规模考虑,它不仅适用于油田井组、部分区块评价,也适用于整个油田评价。同时,对于油田不同增产措施,只要有合适的评价指标和行业评判标准,也具有实际指导意义。

### 3 结论

通过对油田常用开发效果评价指标归纳分类,运用筛选原则和逻辑分析法确定能客观、全面反映油田开发效果的评价指标体系,该体系由水驱采收率(反映开采程度状况)、水驱储量动用程度(反映

井网完善状况)、综合含水上升率(反映含水率变化状况)、单位采油速度综合递减率(反映采油量变化状况)、阶段注采比(反映注水开发状况)、阶段存水率(反映注水利用状况)、阶段水驱指数(反映水驱油效果)、剩余可采储量采油速度(反映储采状况)和能量保持水平(反映地层能量保持状况)组成。

基于灰色关联分析法和层次分析法,确定水驱开发评价指标综合权重,确保了权重与各项开发评价指标影响水驱开发效果重要程度的一致性。考虑不同油田水驱开发评价指标对水驱开发效果反映程度有差异,因此各油田可根据自身油田实际生产动态数据反映的开发效果,结合灰色关联分析法和层次分析法计算评价指标权重结果。对于评分标准,各油田可根据自身实际情况,建立不同原油黏度不同含水率下的分级制评分标准。

油田实际地质模型模拟结果表明,综合分差值与水驱开发效果呈正相关,证明了该评价方法的适用性。此外,该评价方法不仅可应用于油田井组、部分区块的水驱开发效果评价,也可应用于整个油田的评价,具有普遍适用性。

#### 符号解释

- FZ——综合分值;
- k——时刻;
- n——时刻取值范围,即评价指标个数;
- N——序列长度,这里指油田参与计算井组数量;
- p——目前地层压力,MPa;
- p<sub>b</sub>——饱和压力,MPa;
- r<sub>oi</sub>——子序列i与母序列o的关联度;
- w<sub>i</sub>——评价指标综合权重;
- x——评价指标的评价结果;
- y——评价指标的分值;
- x<sub>0</sub>——分级制评分标准中差与中等等级范围界限值;
- y<sub>0</sub>——差等级评价指标的分值,其值为0;
- x<sub>1</sub>——分级制评分标准中好与中等等级范围界限值;
- y<sub>1</sub>——中等等级评价指标的分值,其值为100;
- x<sub>i</sub>——第i个评价指标评价结果;
- y<sub>i</sub>——第i个评价指标分值;
- α<sub>i</sub>——由灰色关联分析法确定的权重;
- β<sub>i</sub>——层次分析法确定的权重;
- Δ<sub>oi</sub>(k)——k时刻母序列与子序列的绝对差;
- Δ<sub>min</sub>, Δ<sub>max</sub>——各个时刻绝对差的最小值和最大值,一般取Δ<sub>min</sub>=0;
- λ——偏好系数,取值范围为0~1,一般取0.5;
- ξ<sub>oi</sub>(k)——k时刻母序列与子序列关联系数;
- ρ——分辨系数,用以削弱Δ<sub>max</sub>过大而引起的关联系数

失真,一般取0.1~0.5,文中取值为0.5;

$\omega_i$ ——指标权重。

### 参考文献

- [1] 王欣然.海上油田聚合物/表面活性剂二元复合驱流度优化设计[J].断块油气田,2020,27(3):344-349.  
WANG Xinran.Mobility optimum design of polymer-surfactant binary composite flooding in offshore oilfield [J]. Fault-Block Oil and Gas Field,2020,27(3):344-349.
- [2] 刘进祥,卢祥国,张云宝,等.无机地质聚合物凝胶堵剂的性能评价[J].油田化学,2020,37(1):35-40.  
LIU Jinxiang, LU Xiangguo, ZHANG Yunbao, et al. Performance evaluation of inorganic geopolymer gel plugging agent [J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(1): 35-40.
- [3] 缪飞飞,黄凯,胡勇,等.渤海油田层间干扰物理模拟研究及应用[J].特种油气藏,2019,26(1):136-140.  
MIAO Feifei, HUANG Kai, HU Yong, et al. Physical simulation of inter-layer interference and its application in Bohai oilfields [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(1): 136-140.
- [4] 冯其红,吕爱民,于红军,等.一种用于水驱开发效果评价的新方法[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(2):58-60.  
FENG Qihong, LÜ Aimin, YU Hongjun, et al. A new method for evaluating waterflooding development effectiveness [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2004, 28(2): 58-60.
- [5] 张宏友,邓琪,王美楠,等.含水率与采出程度关系理论曲线建立新方法[J].断块油气田,2018,25(3):345-349.  
ZHANG Hongyou, DENG Qi, WANG Meinan, et al. New method for studying theoretical relationship curve between water cut and recovery percent [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(3): 345-349.
- [6] 唐海,黄炳光,李道轩,等.模糊综合评判法确定油藏水驱开发潜力[J].石油勘探与开发,2002,29(2):97-99.  
TANG Hai, HUANG Bingguang, LI Daoxuan, et al. Determining water driving effectiveness of oil reservoir with fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(2): 97-99.
- [7] 殷代印,何瑞,汪勇.榆树林油田模糊综合评判经济调剖选井方法[J].特种油气藏,2020,27(3):82-87.  
YIN Daiyin, HE Rui, WANG Yong. Economic profile-control well optimization with fuzzy comprehensive evaluation in Yushulin Oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 82-87.
- [8] 李承龙,韩昊.用灰色模糊综合评估法识别注气初期CO<sub>2</sub>气窜通道[J].大庆石油地质与开发,2018,37(6):116-120.  
LI Chenglong, HAN Hao. Identification of the gas channeling by grey-fuzzy complex judging method at the early stage of CO<sub>2</sub> flooding [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(6): 116-120.
- [9] 宋子齐,赵磊,康立明,等.一种水驱开发地质潜力综合评价方法在辽河油田的应用[J].断块油气田,2004,11(2):32-37.  
SONG Ziqi, ZHAO Lei, KANG Liming, et al. An application of evaluation for water-drive geologic potential in Liaohe Oilfield [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2004, 11(2): 32-37.
- [10] 吴育平,孙卫,魏驰,等.基于聚类分析和灰色关联分析法的储层综合评价——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长6<sup>1</sup>储层为例[J].油气藏评价与开发,2018,8(1):12-15,23.  
WU Yuping, SUN Wei, WEI Chi, et al. Reservoir comprehensive evaluation based on cluster analysis and gray correlative analytical method: A case study in Chang-6<sup>1</sup> formation of Jiyuan area in Ordos Basin [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2018, 8(1): 12-15, 23.
- [11] 吴蒙,朱超,秦云虎,等.临兴地区山西组致密砂岩气开采潜力地质评价方法[J].吉林大学学报:地球科学版,2020,50(4):991-1002.  
WU Meng, ZHU Cao, QIN Yunhu, et al. Geological evaluation method of tight sandstone gas exploitation potential in Shanxi Formation in Linxing Area [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2020, 50(4): 991-1002.
- [12] 张继风.水驱油田开发效果评价方法综述及发展趋势[J].岩性油气藏,2012,24(3):118-122.  
ZHANG Jifeng. Evaluation methods of development effect for water drive oilfield and development trend [J]. Lithologic Reservoirs, 2012, 24(3): 118-122.
- [13] 刘义刚,孟祥海,张云宝,等.海上油田分注分采效果及其影响因素数值模拟——以渤海SZ36-1油田为例[J].石油地质与工程,2020,34(4):95-101.  
LIU Yigang, MENG Xianghai, ZHANG Yunbao, et al. Numerical simulation of separate-layer injection-production effect and its influencing factors in offshore oilfield-by taking SZ36-1 oilfield in Bohai sea as an example [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(4): 95-101.
- [14] 邓聚龙.灰色控制系统[J].华中工学院学报,1982,10(3):9-18.  
DENG Julong. The grey control system [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1982, 10(3): 9-18.
- [15] 崔耀南,岳登台.油田开发水平分级:SY/T 6219—1996[S].北京:中国石油天然气总公司,1997.  
CUI Yaonan, YUE Dengtai. Classification of oilfield development level: SY/T 6219-1996 [S]. Beijing: China National Petroleum Corporation, 1997.
- [16] 张宏友.海上中高渗透率水驱砂岩油藏开发水平分级:Q/HS 2105—2017[S].北京:中国海洋石油集团有限公司,2018.  
ZHANG Hongyou. Development level classification of offshore medium and high permeability water drive sandstone reservoirs: Q/HS 2105-2017 [S]. Beijing: CNOOC, 2018.
- [17] 孙伟.特高含水期油田开发评价体系及方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2007.  
SUN Wei. Study of evaluation system and methods for oilfield development in high watercut stage [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007.