

引用格式:王婷婷,吴贵彬,陈建玲,等.基于多因素分析的提高采收率驱替方式优选方法的研究[J].油气藏评价与开发,2022,12(5):803-808.

WANG Tingting, WU Guibin, CHEN Jianling, et al. Optimization of enhanced oil recovery displacement methods based on multifactor analysis[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(5): 803-808.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.05.012

## 基于多因素分析提高采收率驱替方式优选方法的研究

王婷婷<sup>1,2</sup>,吴贵彬<sup>1</sup>,陈建玲<sup>3</sup>,孙勤江<sup>3</sup>,王正波<sup>4</sup>,冯笑含<sup>5</sup>,赵万春<sup>6,7</sup>

(1.东北石油大学电气信息工程学院,黑龙江大庆163318;2.黑龙江省网络与智能控制重点实验室,黑龙江大庆163318;  
3.中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津300459;4.中国石油勘探开发研究院提高采收率国家重点实验室,  
北京1000835;5.东北石油大学石油工程学院,黑龙江大庆163318;6.东北石油大学非常规油气研究所,黑龙江大庆163318;  
7.东北石油大学陆相页岩油气成藏及高效开发教育部重点实验室,黑龙江大庆163318)

**摘要:**为了保证在油田三次采油过程中,新的油田目标区块能够优选出最佳的采油驱替方式,以国内外典型区块三次采油驱替方式矿场应用作为基础,统计分析得到23项油藏参数作为影响采油驱替方式优选的关键参数,并通过模糊评判方法优选出目标区块合适的驱替方式。通过改进的邓氏关联法计算得到目标区块与实例应用区块的关联度,进而预测目标区块采收率,根据预测的采收率来选取最佳的驱替方式。最后,选取国内某油田的新区块作为研究实例,优选得到最佳驱替方式是火烧油层驱替方式,提出的方法为新区块的驱替方式优选提供了计算依据。

**关键词:**三次采油;驱替方式;优选方法;快速类比;多因素

中图分类号:TE327

文献标识码:A

### Optimization of enhanced oil recovery displacement methods based on multifactor analysis

WANG Tingting<sup>1,2</sup>, WU Guibin<sup>1</sup>, CHEN Jianling<sup>3</sup>, SUN Qinjiang<sup>3</sup>, WANG Zhengbo<sup>4</sup>, FENG Xiaohan<sup>5</sup>, ZHAO Wanchun<sup>6,7</sup>

(1. School of Electrical Engineering & Information, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;  
2. Key Laboratory of Network and Intelligent Control in Heilongjiang Province, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. Tianjin Branch of CNOOC Ltd., Tianjin 300459, China; 4. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 1000835, China; 5. School of Petroleum Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 6. Institute of Unconventional Oil & Gas, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 7. Key Laboratory of Continental Shale Hydrocarbon Accumulation and Efficient Development (Northeast Petroleum University), Ministry of Education, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

**Abstract:** In order to ensure that the best oil recovery and displacement method of the new target block of the oilfield could be selected in the process of tertiary oil recovery, based on the application of tertiary oil displacement method in typical blocks at home and abroad, 23 reservoir parameters have been studied as the key parameters that affect the displacement mode, and the fuzzy evaluation method are used in the process. And then, the correlation between the target area and the test area is calculated by the improved Deng's correlation method, so as to predict the recovery ratio of the target area. The study of a new block of some oilfield in China verify that the best displacement mode is fire flooding. The proposed proposed method provides a calculation basis for the optimal displacement method of the new block.

**Keywords:** tertiary oil recovery; displacement method; optimization method; rapid analogy; multifactor

收稿日期:2020-09-07。

第一作者简介:王婷婷(1982—),女,博士,教授,主要从事油气信息与控制工程研究。地址:黑龙江省大庆市萨尔图区东北石油大学,邮政编码:163318。E-mail: wttlovework@163.com

**基金项目:**国家自然科学基金项目“页岩油藏脉动水力压裂缝网实时扩展AE演化机制分数阶方法研究”(52074088);国家自然科学基金项目“页岩局部脆性表征与压裂裂缝交互耦合演化机制研究”(51574088);国家自然科学基金项目“页岩气藏压裂岩体突变特征及多重形缝网逾渗演化研究”(51404073);黑龙江省博士后面上(一等)资助项目“基于AE波形特征大庆探区致密油储层体积压裂缝网形成机制研究”(LBH-Z19008);东北石油大学省杰青后备人才项目“页岩压裂跨尺度造缝三维缝网体系时空演化机制研究”(SJQHB201802);东北石油大学省杰青后备人才项目“页岩油藏脉动水力压裂缝网实时扩展声发射信号传播规律研究”(SJQH202002);2020年度东北石油大学西部油田开拓专项项目“页岩油气成藏机理及高效开发”(XBYTKT202001)。

三次采油技术是提高采收率、稳定老油田原油产量的一项重要技术<sup>[1]</sup>,主要包括采用注入蒸汽、二氧化碳和化学驱等开采技术<sup>[2-4]</sup>。由于不同驱替方式受多种因素影响和限制,在某些区块究竟选择哪一种驱替方式能够最大程度提高采收率还未形成统一的优选方法,这严重制约着油气的高效开发<sup>[5-10]</sup>。为了不同研究区块能够优选出最佳的驱替方式,提出了一种基于多因素分析提高采收率驱替方式优选方法。

模糊综合评判法是计算多因素影响下参数优选的有效方法之一。苗德山等<sup>[11]</sup>对边坡技术状况评价指标进行等级划分过程中引入模糊综合判别法,解决边坡稳定状态与判别指标之间的界限问题;雷柏茂等<sup>[12]</sup>采用模糊综合判别法对中子管故障中不方便量化的系统合成模糊关系,将一些模糊因素定量化,从而对多个因素进行了故障风险综合评价;张云鹏等<sup>[13]</sup>在对遵化凤良铁矿地质环境影响评价研究中,提出用模糊综合评判法确定地质灾害、地形地貌景观、土地资源问题等各项的隶属度,进而建立矿山地质环境影响的模糊综合评判模型;马婧<sup>[14]</sup>运用模糊综合评判法,将模糊综合评判法与层次分析法相结合,建立水驱开发效果评价体系。模糊综合评判法应用在各行各业的多因素评价方法中,但在石油提高采收率方面鲜有报导。结合油田生产实际,调研得到影响三次采油的23项关键参数,并通过精细量化筛选方法厘定了23项参数的取值范围,基于模糊综合判别方法对选取的23项油藏参数在不同驱替方式下进行选取并综合打分,给出该油藏条件下的各影响参数的综合分析,依据分值结果选取满足该区块较为合适的驱替方式。对选取的较为合适的几种驱替方式,进一步通过邓氏关联法预测目标区块在已选适合驱替方式下的最终采收率,根据预测采收率的结果来选取最佳的驱替方式。使用改进的邓氏关联法,解决了原始邓氏关联法中不同油藏参数对驱替方式影响权重不同的问题。原始的邓氏关联法是对所有的油藏关键参数累积取平均值,但在实际情况中,不同的油藏参数对不同的驱替方式的权重也不同<sup>[15-16]</sup>。为贴近油田实际情况,在原始邓氏关联法的基础上稍加改进,其改进后的邓氏关联法是按照不同三次采油驱替方式中所占重要程度的比重来进行分析目标区块与实例区块的具体参数关联度。根据关联度优选出与目标区块最匹配的实例区块,

并通过动用地质储量之比,预测目标区块最终采收率,最后通过预测目标区块在不同驱替方式下的采收率,来优选出新区块最佳的驱替方式。

## 1 三次采油技术精细量化筛选方法

### 1.1 精细量化筛选模型建立

三次采油技术精细量化筛选方法主要是根据23项具体油藏条件,对每一种提高采收率技术可行性进行综合性打分,快速对油田三次采油方式进行初步筛选及评估。综合打分流程如下:

设集合  $U = \{x_i | x_i \in 23 \text{项具体油藏参数}\}$ , 集合  $V = \{y_i | y_i \in 9 \text{种三次采油驱油方式}\}$ ; 其中集合  $U$  和  $V$  的直积  $UV = \{(x_i, y_i) | x_i \in 23 \text{项油藏参数}, y_i \in 9 \text{种三次采油驱油方式}\}$  中的模糊子集  $R$  被称为  $U$  到  $V$  的二元模糊关系, 用矩阵表示为:

$$R = \begin{bmatrix} \mu(x_1, y_1) & \mu(x_1, y_2) & \cdots & \mu(x_1, y_n) \\ \mu(x_2, y_1) & \mu(x_2, y_2) & \cdots & \mu(x_2, y_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu(x_m, y_1) & \mu(x_m, y_2) & \cdots & \mu(x_m, y_n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$A = [a_1, a_2, \cdots, a_m] \quad (2)$$

$$S = A \circ R = [a_1, a_2, \cdots, a_m] \circ \begin{bmatrix} \mu(x_1, y_1) & \mu(x_1, y_2) & \cdots & \mu(x_1, y_n) \\ \mu(x_2, y_1) & \mu(x_2, y_2) & \cdots & \mu(x_2, y_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu(x_m, y_1) & \mu(x_m, y_2) & \cdots & \mu(x_m, y_n) \end{bmatrix} \\ = [S_1, S_2, \cdots, S_n] \quad (3)$$

式中:  $S_i = \{[a_1 \wedge \mu(x_1, y_i)] \vee [a_2 \wedge \mu(x_2, y_i)] \vee [a_3 \wedge \mu(x_3, y_i)] \vee \cdots \vee [a_n \wedge \mu(x_n, y_i)]\}$ ;  $S$  为筛选综合打分结果 ( $S_i$  代表使用第  $i$  种驱油方式的打分结果);  $a_1, a_2, \cdots, a_m$  为单参数根据筛选标准打分结果;  $\mu(x_i, y_j)$  代表第  $i$  个油藏筛选参数在第  $j$  个三次采油驱油方式中的占比,  $a_i, \mu(x_i, y_j) \in (0, 1)$ 。

### 1.2 精细定量筛选标准的制定

在三次采油过程中,针对不同驱油方式进行精细量化评价时,选用不同三次采油方式所需考虑影响因素存在差异<sup>[17-21]</sup>。经广泛调研和专家论证,评选筛选参数共计23项,如表1所示。

### 1.3 精细定量筛选法

根据不同的三次采油驱油方式确定对应精细量

化筛选标准,划分不同油藏影响中参数所占的比重。并进行赋值。根据此比例采用模糊判别方法计算目标区块在不同三次采油方式下的综合打分。最后系统筛选出综合打分结果大于0.5的驱替方式作为目标区块三次采油驱替方式的备选方案。

## 2 三次采油潜力快速类比模型研究

先将三次采油不同区块影响参数给予打分,结果共5个档位,分别为0、0.25、0.50、0.75、1.00,并记作 $X_i$ ,即 $X_i=\{x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, \dots, x_{ni}\}$ 。

将目标区块的参数按照实例区块的标准予以打分,并记作 $X_0$ ,即 $X_0=\{x_{10}, x_{20}, x_{30}, \dots, x_{n0}\}$ 。

在对目标区块 $X_0$ 和若干实例区块 $X_i$ 中使用邓氏关联法可先计算目标区块和每个实例区块的第 $k$ 个关键油藏具体参数的关联系数:

$$y_i(k) = \frac{a + A\xi}{i(k) + A\xi} \quad (4)$$

其中, $\Delta i(k)$ 代表目标区块与第 $i$ 个实例区块的第 $k$ 个关键油藏具体参数的绝对差, $\Delta i(k)=|x_{ki} - x_{0k}|$  ( $k=\{1, 2 \dots n\}, i=\{1, 2 \dots m\}$ ); $a$ 为两者的最小差,即 $a = \min_{1 \leq k \leq n} \min_{1 \leq j \leq m} \{\Delta i(k)\}$ ;  $A$ 为两者的最大差, $A = \max_{1 \leq k \leq n} \max_{1 \leq j \leq m} \{\Delta i(k)\}$ ;  $\xi$ 为分辨系数,用来提高关联系数之间差异的显著性,通常情况下取 $\xi=0.5$ 。

改进的邓氏关联度算法为:

$$R_i = \sum_{k=1}^n W_k y_i(k) \quad (5)$$

式中: $W_i$ 为第 $i$ 个关键油藏参数的权重值, $0 \leq W_i < 1$ ,根据三次采油驱油方式的情况给出。

## 3 实例分析

以中国的实际油田研究区块作为实例,利用模糊判别方法对不同驱替方式下目标区块23项油藏参数进行综合打分(图1)。

计算结果表明:目标区块在重力驱、碱聚二元驱、聚表二元驱、混相气驱、非混相气驱和蒸汽驱中,按照油田专家的评审结果,综合打分结果低于0.5,不适合作为驱油方式。因此,上述6项驱替方法,不适合作为该区块的驱油方式;聚合物驱、三元复合驱、火烧油层综合打分结果高于0.5,该区块适合聚合物驱、三元复合驱、火烧油层驱替方式,但具体选用哪一种驱替方式仍需进行潜力评价定量分析。将使用聚合物驱、三元复合驱和火烧油层驱替方式的油田分别标注为实例区块A、B、C,其区块和目标区块的具体参数如表2所示。对目标区块的油藏具体参数在不同实例区块的驱替方式下予以打分结果为0、0.25、0.50、0.75、1.00,共5个档位(图2—图4)。通

表1 筛选参数汇总

Table 1 Screening parameters

参数名称	取值范围	参数类别
油藏类型		地质参数
岩石特征		地质参数
油藏埋深(m)	0~10 000	地质参数
油层压力(MPa)		地质参数
油层温度(°C)	0~200	地质参数
平均单层有效厚度(m)	0~250	地质参数
净毛比	0~1	地质参数
孔隙度(%)	0~100	地质参数
空气渗透率( $10^{-3} \mu\text{m}^2$ )	0~30 000	地质参数
含油饱和度(%)	0~100	地质参数
渗透率变异系数	0~1	地质参数
底水影响		地质参数
边水影响		地质参数
裂缝/溶洞		地质参数
地层倾角		地质参数
气源		地质参数
上下隔层及管窜封闭性		地质参数
地层倾角		地质参数
单储系数[ $10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{m})$ ]	0~150	地质参数
地层原油黏度( $\text{mPa} \cdot \text{s}$ )	0~100 000	流体参数
原油密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.5~1.0	流体参数
原油酸值( $\text{mg} \cdot \text{KOH}/\text{g}$ )	0~40	流体参数
地层水矿化度( $\text{mg}/\text{L}$ )	500~300 000	流体参数
二价离子含量( $\text{mg}/\text{L}$ )	0~5 000	流体参数

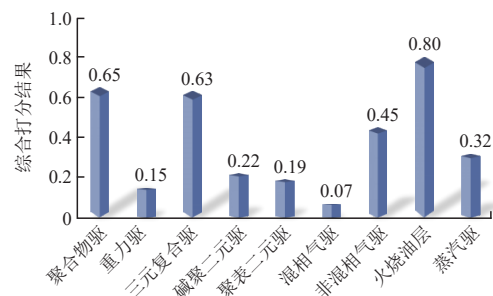


图1 不同方法筛选综合打分结果  
Fig. 1 Comprehensive scoring results of different screening methods

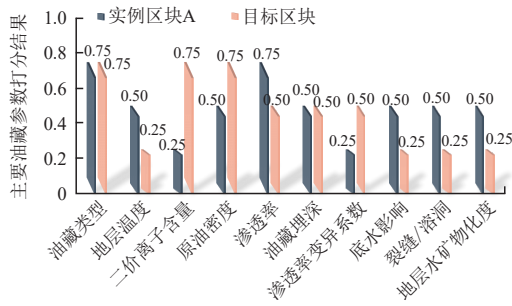


图2 目标区块与实例区块A在聚合物驱替方式下主要油藏参数打分结果对比

Fig. 2 Scoring results comparison of main reservoir parameters of target block and example Block-A under polymer flooding mode

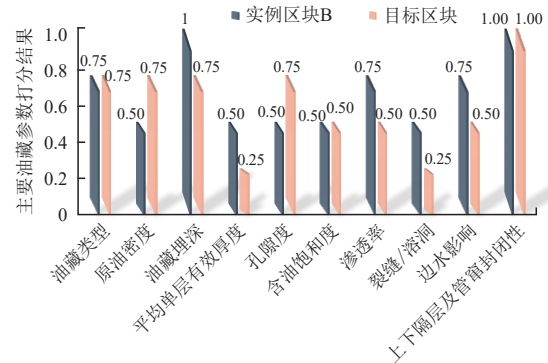


图3 目标区块与实例区块B在火烧油藏驱替方式下主要油藏参数打分结果对比

Fig. 3 Scoring results comparison of main reservoir parameters of target block and example Block-B under fire flooding mode

表2 实例分析数据  
Table 2 Case analysis data

评价参数(量化打分)	实例区块A	实例区块B	实例区块C	目标区块
驱替方式	聚合物驱	火烧油层	三元复合驱	待匹配
油藏类型	整装及规则扩大应用井网的断块	整装及规则扩大应用井网的断块	整装及规则扩大应用井网的断块	整装及规则扩大应用井网的断块
岩石特征	砂岩	砂岩	砂岩	砾岩
油藏埋深(m)	2 330	1 300	2 622	2 313
油层压力(MPa)	大于等于最低混相压力	大于等于最低混相压力	大于等于最低混相压力	大于等于最低混相压力
油层温度(℃)	78	70	82	91
平均单层有效厚度(m)	10.2	3.7	9.1	2.8
净毛比	0.58	0.52	0.64	0.68
孔隙度(%)	15	21	23	33
空气渗透率(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> )	325	250	320	135
含油饱和度(%)	58	30	26	27
渗透率变异系数	0.53	0.60	0.63	0.57
底水影响	较小	无	无	较小
边水影响	无	较小	无	一般
裂缝/溶洞	一般	一般	微小	大
地层倾角	6	18	12	33
气源	无	无	无	空气
上下隔层及管窜封闭性	基本封闭	完全封闭	完全封闭	完全封闭
单储系数[10 <sup>4</sup> t/(km <sup>2</sup> ·m)]	16	18	20	15
地层原油黏度(mPa·s)	58	900	120	70
原油密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.69	0.50	0.85	0.56
原油酸值(mg·KOH/g)	16.62	28.88	11.15	12.43
地层水矿化度(mg/L)	12 212	5 132	52 312	31 872
二价离子含量(mg/L)	560	23	19	130
提高采收率(%)	26.54	35.87	31.22	34.26

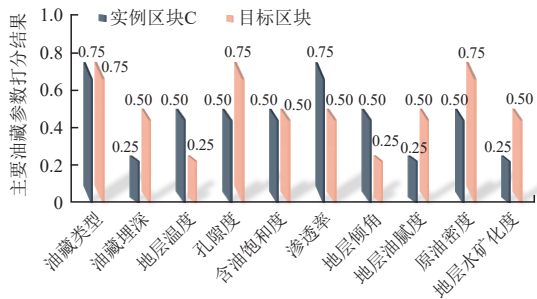


图4 目标区块与实例区块C在三元复合驱替方式下主要油藏参数打分结果对比

Fig. 4 Scoring results of main reservoir parameters of target block and example Block-C under compound flooding mode

过改进的邓氏关联法求解得出:目标区块与实例区块A、B、C之间的关联度分别为0.275、0.912和0.484,目标区块与实例区块B之间具有更高的关联度。因此,可以选择实例区块B作为参考目标,采用火烧油层的驱油方式作为开发手段。

## 4 结论

1) 以23项储层及流体特征参数作为评价指标,建立精细三次采油技术筛选标准;利用模糊判别方法,将原有定性筛选改进为定量打分方式,可直观、快速、准确预测出研究区块适宜的三次采油驱油方式。

2) 通过改进原始邓氏关联度计算方法,类比得到代表区块与数据库中各油田实例区块之间关联度,根据类比打分指定与代表区块最匹配的实例区块,预测代表区块的最终采收率为34.26%,与火烧油层驱替方式接近。

### 参考文献

[1] JÜRGENSON G A, BITTNER C, STEIN S, et al. Chemical EOR: A multidisciplinary effort to maximize value[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2017, 69(6): 52-53.

[2] WANG T T, ZHANG T, RANJITH P G, et al. A new approach to the evaluation of rock mass rupture and brittleness under triaxial stress condition[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 184.

[3] ZIJLSTRA E, VAN WUNNIK J, VAN DOREN J, et al. Accurate tool for IOR/EOR screening and estimating target recovery factors[C]// Paper SPE-169653-MS prepared at the SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia held in Muscat, Oman, 31 March-2 April 2014.

[4] 秦积舜,韩海水,刘晓蕾.美国CO<sub>2</sub>驱油技术应用及启示[J].

石油勘探与开发,2015,42(2):209-216.

QIN Jishun, HAN Haishui, LIU Xiaolei. Application and enlightenment of carbon dioxide flooding in the United States of America[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(2): 209-216.

[5] 赵文山.三次采油阶段提高采收率的措施[J]. *化工设计通讯*, 2017,43(5):50.

ZHAO Wenshan. Measures to improve oil recovery in tertiary oil recovery[J]. *Chemical Design Newsletter*, 2017, 43(5): 50.

[6] 朱友益,侯庆锋,简国庆,等.化学复合驱技术研究与应用现状及发展趋势[J]. *石油勘探与开发*,2013,40(1):90-96.

ZHU Youyi, HOU Qingfeng, JIAN Guoqing, et al. Current development and application of chemical combination flooding technique[J]. *Petroleum exploration and development*, 2013, 40(1): 90-96.

[7] 刘培军,陈金辉,申权,等.三次采油方法及原理综述[J]. *化工管理*,2013,26(8):16.

LIU Peijun, CHEN Jinhui, SHEN Quan, et al. Summary of tertiary oil recovery methods and principles[J]. *Chemical Management*, 2013, 26(8): 16.

[8] 田静.三次采油技术的现状及发展趋势[J]. *科学中国人*, 2015,21(29):45.

TIAN Jing. The status of enhanced oil recovery research and Development trend[J]. *Scientific Chinese*, 2015, 21(29): 45.

[9] 刘哲.浅析三次采油技术的现状及发展趋势[J]. *化学工程与装备*,2016,45(4):213-214.

LIU Zhe. Analysis on the current situation and development trend of tertiary oil recovery technology[J]. *Chemical Engineering & Equipment*. 2016, 45(4): 213-214.

[10] KOROTEEV D, DINARIEV O, EVSEEV N, et al. Application of digital rock technology for chemical EOR screening[C]// Paper SPE-165258-MS presented at the SPE Enhanced Oil Recovery Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, July 2013.

[11] 张金川,刘树根,魏晓亮,等.页岩含气量评价方法[J]. *石油与天然气地质*,2021,42(1):28-40.

ZHANG Jinchuan, LIU Shugen, WEI Xiaoliang, et al. Evaluation of gas content in shale[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(1): 28-40.

[12] 雷柏茂,李江燕,梁佩博,等.基于模糊综合评判和层次分析法的中子管故障风险评估[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(11):2247-2256.

LEI Bomao, LI Jiangyan, LIANG Peibo, et al. Risk assessment of neutron tube failure based on fuzzy comprehensive evaluation and analytic hierarchy process[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(11): 2247-2256.

[13] 张云鹏,马雪坤,王浩.基于模糊综合评判的风良铁矿地质环境影响评价研究[J]. *化工矿物与加工*,2018,47(4):4.

ZHANG Yunpeng, MA Xuekun, WANG Hao. Assessment of impact of geological environment in Fengliang Iron Mine based on fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2018, 47(4): 4.

[14] 马婧.基于模糊综合评判法的油田水驱开发效果评价[J]. *辽宁化工*,2016,45(6):785-787.

MA Jing. Evaluation of oilfield water flooding development

- effect based on the fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Liaoning Chemical Industry, 2016, 45(6): 785-787.
- [15] ZERAFAT M, AYATOLLAHI SH, MEHRANBOD N. Bayesian network analysis as a tool for efficient EOR screening[C]// Paper SPE-143282-MS presented at the SPE Enhanced Oil Recovery Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, July 2011.
- [16] WEI Y, GAO YQ, ZENG K F. The limitation of Deng's relevance degree and the evolution of relevance axiom[J]. Journal of applied functional analysis, 2015, 17(4): 391-399.
- [17] 赵文山. 三次采油阶段提高采收率的措施[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(5): 50.  
ZHAO Wenshan. Measures to improve oil recovery in three-stage oil recovery[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43(5): 50.
- [18] 高双华, 姚国平, 蔡晓梅, 等. 二次聚合物驱提高采收率技术[J]. 新疆石油天然气, 2015, 11(1): 51-54.  
GAO Shuanghua, YAO Guoping, CAI Xiaomei, et al. The improve oil recovery technology of second polymer flooding[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2015, 11(1): 51-54.
- [19] 朱友益, 侯庆锋, 简国庆, 等. 化学复合驱技术研究与应用现状及发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 90-96.  
ZHU Youyi, HOU Qingfeng, JIAN Guoqing, et al. Current development and application of chemical combination flooding technique[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 90-96.
- [20] 胡蓉蓉, 姚军, 王晨晨, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏非混相气驱采收率影响因素[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(4): 470-474.  
HU Rongrong, YAO Jun, WANG Chenchen, et al. Influence factors of immiscible gas flooding recovery in fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(4): 470-474.
- [21] 康志江, 李阳, 计秉玉, 等. 碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率关键技术[J]. 石油与天然气地质, 2020, 4(6): 434-441.  
KANG Zhijiang, LI Yang, JI Bingyu, et al. Key technologies for EOR in fractured-vuggy carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 434-441.

(编辑 徐佩)

.....

(上接第 783 页)

- [8] KAMEDA J, SUGIMORI H, MURAKAMI T. Modification to the crystal structure of chlorite during early stages of its dissolution[J]. Physics & Chemistry of Minerals, 2009, 36(9): 537-544.
- [9] SMITH M M, WOLERY T J, CARROLL S A. Kinetics of chlorite dissolution at elevated temperatures and CO<sub>2</sub> conditions [J]. Chemical Geology, 2013, 347: 1-8.
- [10] BLACK J R, HAESE R R. Batch reactor experimental results for GaMin' 11: Reactivity of siderite/ankerite, labradorite, illite and chlorite under CO<sub>2</sub> saturated conditions[J]. Energy Procedia, 2014, 63: 5443-5449.
- [11] LU J M, KHARAKA Y K, THORSEN J J, et al. CO<sub>2</sub>-rock-brine interactions in Lower Tuscaloosa Formation at Cranfield CO<sub>2</sub> sequestration site, Mississippi, U.S.A[J]. Chemical Geology, 2012, 291(1): 269-277.
- [12] DEER W A, HOWIE R A, ZUSSMAN J. An introduction to the rock-forming minerals[M]. Kent: Prentice Hall, 2013.
- [13] NAGY K L. Dissolution and precipitation kinetics of sheet silicates[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1995, 31(1): 173 - 233..
- [14] LOWSON R T, BROWN P L, COMARMOND M-C J, et al. The kinetics of chlorite dissolution[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2007, 71(6): 1431-1447.
- [15] 唐洪明. 常规稠油油藏储层损害机理与保护技术研究[D]. 成都: 西南石油学院, 2003.  
TANG Hongming. Research on reservoir damage mechanism and protection technology of conventional heavy oil reservoir [D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2003.
- [16] 唐洪明, 赵峰, 李泉, 等. 绿泥石与土酸、氟硼酸反应实验研究[J]. 油田化学, 2007, 24(4): 307-309.  
TANG Hongming, ZHAO Feng, LI Gao, et al. Experiment study on reactions of chlorite with mud and fluoboric acids[J]. Oilfield Chemistry, 2007, 24(4): 307-309.
- [17] GILFILLAN S M V, LOLLAR B S, HOLLAND G, et al. Solubility trapping in formation water as dominant CO<sub>2</sub> sink in natural gas fields[J]. Nature, 2009, 458: 614-618.
- [18] KASZUBA J P, JANECKY D R, SNOW M G. Carbon dioxide reaction processes in a model brine aquifer at 200°C and 200 bars: Implications for geologic sequestration of carbon[J]. Applied Geochemistry, 2003, 18(7): 1065-1080.
- [19] WATSON M N, ZWINGMANN N, LEMON N M. The Ladbroke Grove-Katnook Carbon Dioxide Natural Laboratory: A recent CO<sub>2</sub> accumulation in a lithic sandstone reservoir[C]// Paper presented at the 6th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Kyoto, Japan, October 2002.
- [20] BLACK J R, HAESE R R. Chlorite dissolution rates under CO<sub>2</sub> saturated conditions from 50 to 120 °C and 120 to 200 bar CO<sub>2</sub> [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 125: 225-240.
- [21] ROSENBAUER R J, KOKSALAN T, PALANDRI J L. Experimental investigation of CO<sub>2</sub>-brine-rock interactions at elevated temperature and pressure: Implications for CO<sub>2</sub> sequestration in deep-saline aquifers[J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(14-15): 1581-1597.
- [22] KIRSTE D M, WATSON M N, TINGATE P R. Geochemical modelling of CO<sub>2</sub>-water-rock interaction in the Pretty Hill Formation, Otway Basin, Eastern Australasian basins symposium II [C]// Paper presented at the PESA Eastern Australasian Basins Symposium II, [S.l.], 2004.
- [23] LUQUOT L, ANDREANI M, GOUZE P, et al. CO<sub>2</sub> percolation experiment through chlorite/zeolite-rich sandstone (Pretty Hill Formation - Otway Basin-Australia) [J]. Chemical Geology, 2012, 294-295: 75-88.

(编辑 尹淑容)