

文章编号: 1673-5005 (2008) 01-0072-05

注 CO₂ 混相驱油藏筛选新方法

雷怀彦^{1,2}, 龚承林¹, 官宝聪¹

(1. 厦门大学 海洋与环境学院、近海海洋环境科学国家重点实验室, 福建 厦门 361005;
2. 中国科学院 地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 注 CO₂ 混相驱是一种提高原油采收率的重要手段, 实施该方法的关键是筛选出具有开发潜力的油藏。目前, 在注 CO₂ 混相驱油藏的筛选上, 缺乏统一的筛选指标和筛选方法。通过对国内外注 CO₂ 混相驱油藏开采情况的分析和对比研究, 选取了影响注 CO₂ 开采效果的 12 个筛选指标, 利用概率与数理统计方法提出了筛选指标的评价标准, 并应用模糊优选理论和模糊层次分析法, 建立了区间数注 CO₂ 混相驱油藏筛选模型。应用该筛选方法对 6 个典型的候选油藏进行了筛选排序和综合评价。结果表明, 该方法能够客观地评估油藏注 CO₂ 开发潜力的大小。

关键词: 注 CO₂ 混相驱; 筛选指标; 评价标准; 区间数筛选模型

中图分类号: TE 344 **文献标识码:** A

New screening method for reservoir by CO₂ injection miscible flooding

LEI Huai-yan^{1, 2}, GONG Cheng-lin¹, GUAN Bao-cong¹

(1. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Oceanography and Environmental Science of Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China;
2. Lanzhou Research Center of Petroleum Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: CO₂ injection miscible flooding is an important method for enhanced oil recovery (EOR). It is important to screen out the potential reservoirs for using the method. Now, there are not uniform screening indexes and method about screening out CO₂ injection miscible flooding reservoirs. Based on the analysis and researches of the CO₂ injection miscible flooding reservoirs, 12 indexes affecting CO₂ injection miscible flooding results were picked out. By the method of probability statistics, the assessment criterions were brought forward. And combining with fuzzy optimum and fuzzy analytical hierarchy process (FAHP), the interval number screening model for CO₂ injection miscible flooding reservoirs was successfully established. This screening method was used to screen and assess six classical candidate reservoirs about CO₂ injection miscible flooding. The results show that the method could perfectly evaluate and screen the potential of CO₂ injection of the candidate reservoir.

Key words: CO₂ injection miscible flooding; screening index; assessment criterion; interval number screening model

注 CO₂ 提高采收率 (EOR) 已成为世界范围内提高原油产量的重要手段之一^[1-2]。一般油藏的开发都需要经历靠弹性能量开采的“一次采油”阶段, 此阶段采收率不高, 一般仅在 5% ~ 20%。其后是注水开发的“二次采油”阶段, 在这一阶段采收率可达 20% ~ 40%, 但仍有一半以上的原油滞留在地层

中。如果实施注 CO₂ 混相驱的“三次采油”方法, 则原油的采收率可达 90% 以上^[3]。实施注 CO₂ 混相驱油藏开发的前提是筛选出具有注 CO₂ 开发潜力的油藏, 但目前在注 CO₂ 混相驱油藏的筛选上, 缺乏统一的筛选指标和筛选方法^[4]。我国适合于注 CO₂ 混相驱开发的原油地质储量在 10.57 × 10⁸ t 以

收稿日期: 2007 - 10 - 17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40472156)

作者简介: 雷怀彦 (1960 -), 男 (汉族), 陕西咸阳人, 教授, 博士生导师, 主要从事油气地质、海洋地质等研究工作。

上^[3]。在我国能源日趋短缺的情况下,发展注 CO₂ 混相驱候选油藏的筛选理论和方法已迫在眉睫。1992 年路易斯安纳州立大学开展了水驱后轻油油藏注 CO₂ 驱油综合评价方法^[5],此后, Daniel Diaz 提出了用 8 个评价参数的权重向量乘以参数适宜度矩阵对注 CO₂ 混相油藏进行筛选^[6], Thomas 采用打分的方式对油藏进行注气适宜度评价^[7]。李士伦、郭平等列出了注烃混相驱油藏筛选准则^[8],熊钰首先提出了用模糊层次分析法 (FAHP) 对注 CO₂ 混相驱油藏进行综合筛选^[4]。上述注 CO₂ 混相驱油藏筛选准则有时因为某一参数不理想而否决有实施注 CO₂ 混相驱开发潜力的油藏。为了客观地反映地层的真实情况,降低油藏筛选的盲目性,笔者对影响注 CO₂ 混相驱油藏开发效果的各种因素进行分析,选取 12 个注 CO₂ 混相驱油藏的筛选指标,利用概率与数理统计的方法和模糊优选理论建立筛选指标的评价标准和区间数注 CO₂ 混相驱油藏筛选模型,以提高油藏筛选的准确性和可靠性。

1 注 CO₂ 混相驱油藏的筛选指标

在不同的油藏条件下,注 CO₂ 的作用是不同的,相应的驱油机理也不同^[9]。因此,系统分析影响注 CO₂ 效果的各种因素、选择合适的筛选指标是建立注 CO₂ 混相驱油藏筛选模型的基础。

1.1 岩石特征指标

储集层岩石物性特征对油气的储存或开采有着重要的影响^[10],通过对实施注 CO₂ 混相驱开发的油藏中润湿性影响因素、混相驱中的流态、界面张力和粘性指进的分析和对比研究,认为需要考虑的注 CO₂ 混相驱油藏开采效果的储层岩石特征指标为:

(1)有效孔隙度。储层岩石的有效孔隙度越大,注入的 CO₂ 就越容易发生超覆流动和指进现象,从而不利于油藏的开采;但如果储层岩石的有效孔隙度太低,CO₂ 就难以注入地层。因此,储层岩石的有效孔隙度不宜过高也不宜过低。

(2)渗透率。对于注 CO₂ 开发的油藏,低渗透率可提供充分的混相条件,减少重力分离,渗透率太高容易导致早期气窜,从而造成较低的驱油效率^[3]。因此,储层岩石的渗透率越小越好。

(3)润湿性。理论研究和岩心驱替试验表明,在水湿介质中由于水的存在会使水锁现象更加严重,从而不利于注 CO₂ 混相驱油藏的开发,所以储层岩石的润湿性越高,CO₂ 驱油效果越好。

(4)非均质性。对于注 CO₂ 混相驱开发,在层

状非均质油藏中,注入的 CO₂ 常优先进入高渗透层,导致当低渗透层中的原油尚未被完全驱扫时,CO₂ 已从高渗透层突入到生产井中,从而使驱油效率降低。因此,储层岩石的非均质性越小越好。

1.2 油藏特征指标

通过对实施注 CO₂ 混相驱开发的油藏中所需最小混相驱压力 (MMP) 和重力的影响因素分析和对比研究,认为影响注 CO₂ 混相驱油藏开采效果的油藏特征指标主要有:

(1)油藏温度。在 CO₂ 混相驱中,MMP 随油藏温度的升高而增加^[10],说明油藏温度过高对注 CO₂ 混相驱油藏的开采不利,但是油藏温度过低会使原油粘度增大,从而不利于注 CO₂ 混相驱油藏的开采。因此,油藏温度不宜过高也不宜过低。

(2)油层压力。为了取得好的驱油效果,往往要求油藏具有较高的油层压力,但是油层压力过高会使工程强度和风险程度加大。因此,油藏的油层压力不宜过高也不宜过低。

(3)油藏倾角。从倾斜油藏构造的上端部位注入 CO₂,通过重力分离使 CO₂ 形成次生气顶,从而将残留在顶部的剩余油驱向位于油藏下部的井而采出。理论上讲,油藏倾角越大,利用注 CO₂ 来提高原油采收率的效果就会越明显。

(4)油藏深度。李士伦指出注 CO₂ 混相驱油藏的最小埋藏深度为 760 m,但是随着油藏深度的增加,工程强度和风险程度也会随之增大。因此,油藏深度不宜过高也不宜过低。

(5)储层厚度。储层厚度的增加会导致烃相之间发生重力对流分离和重力舌进,且储层厚度越大层间矛盾就越突出^[3]。因此,储层厚度越小越好。

1.3 原油特征指标

通过对实施注 CO₂ 混相驱开发的油藏中界面张力、MMP 的影响因素和原油相对密度的分析和对比研究,认为影响注 CO₂ 混相驱油藏开采效果的原油特征指标主要有:

(1)原油粘度。粘度高的原油不仅增加了驱动能量的消耗,而且在注 CO₂ 混相驱开发的过程中,由于 CO₂ 的粘度小而容易形成平面上 CO₂ 的突进,造成 CO₂ 过早突破,原油与 CO₂ 的粘度比越大驱油效率就越低。因此,原油粘度越小越有利于注 CO₂ 混相驱油藏的开发。

(2)原油密度。原油密度越高,在注 CO₂ 混相驱开发的油藏中越容易形成粘性指进,驱油效果就越差。因此,原油密度越小越有利于注 CO₂ 混相驱

油藏的开发。

(3)原油饱和度。高的原油饱和度是取得好的驱油效果的前提,如果原油饱和度太低,在注 CO₂ 开发油藏中就难以形成连续油带。从理论上讲,原油饱和度越大,利用注 CO₂ 来提高原油采收率的效果就会越明显。

2 注 CO₂ 混相驱油藏的评价标准

筛选指标按属性通常分为成本型、固定型和效益型 3 类筛选指标^[11]。

2.1 成本型筛选指标

在所确定的注 CO₂ 混相驱筛选指标中,渗透率、非均质性、储层厚度、原油粘度和原油密度属于成本型筛选指标,它们的评价标准是越小越优^[12]。

2.2 固定型筛选指标

有效孔隙度、油藏温度、油层压力和油藏深度属于固定型筛选指标,它们的评价值越接近某一固定值越好^[12]。在所统计的 38 个国内外实施注 CO₂ 混相驱开采的油藏中,有效孔隙度的分布如表 1 所示。

表 1 注 CO₂ 油藏的有效孔隙度区间

有效孔隙度 e / %	实施注 CO ₂ 油藏数 n	分布密度 f
<6	1	0.0263
6~12	15	0.3947
12~18	13	0.3421
18~24	4	0.1053
>24	5	0.1316

从表 1 可以看出,有效孔隙度基本上呈正态分布,且为离散型筛选指标。因此,可以采用单个正态参数区间估计的方法确定其评价标准,即

$$\left[\bar{x} - u_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{s^2}{n}}, \bar{x} + u_{\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{s^2}{n}} \right] \quad (1)$$

式中, \bar{x} 为筛选指标的均值; $u_{\frac{\alpha}{2}}$ 为置信度 (本文中为选择 90%); s^2 为筛选指标的标准方差; n 为筛选指标的个数。根据式 (1) 得到有效孔隙度的评价标准为 [12.22%, 22.28%]。

在所统计的 52 个国内外实施注 CO₂ 混相驱开采的油藏中,油藏温度的分布如表 2 所示。

表 2 注 CO₂ 混相驱的油藏温度区间

油藏温度 t / °C	实施注 CO ₂ 油藏数 n	分布密度 f
35~55	1	0.0192
55~70	4	0.0769
70~85	15	0.2885
85~100	22	0.4231
100~120	6	0.1154
120~140	4	0.0769

从表 2 可以看出,油藏温度基本上呈正态分布,且为离散型筛选指标。依据概率与数理统计的方法结合式 (1) 得到油藏温度的评价标准为 [80, 100]。

在所统计的 62 个国内外实施注 CO₂ 混相驱开采的油藏中,油藏深度的分布如表 3 所示。

表 3 注 CO₂ 混相驱的油藏深度区间

油藏深度 H / 100 m	实施注 CO ₂ 油藏数 n	分布密度 f
<10	4	0.0645
10~15	10	0.1612
15~20	28	0.4516
20~25	12	0.1935
25~30	5	0.0806
30~45	3	0.0483

从表 3 可以看出油藏深度基本上呈正态分布,且为离散型筛选指标。依据概率与数理统计的方法结合式 (1) 得到油藏深度的评价标准为 [1500 m, 2500 m]。

根据不同注 CO₂ 的最小混相压力范围和油藏压力对注气工程的适宜性分析,得到油层压力的评价标准为 [16.8 MPa, 22 MPa]。

2.3 效益型筛选指标

润湿性、油藏倾角和原油饱和度属于效益型筛选指标,它们的评价标准是越大越优。

3 区间数注 CO₂ 混相驱油藏筛选模型的建立

3.1 筛选矩阵的规范化

设在 n 个欲实施注 CO₂ 混相驱的油藏中进行筛选,每个油藏有 m 个筛选指标,则可以形成一个 m 行 n 列的候选油藏筛选指标矩阵 X ,即

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} = (x_{ij}) \quad (2)$$

X 中任一元素 x_{ij} 表示候选油藏 j 的第 i 个筛选指标,其中 $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

对于成本型筛选指标用下式进行规范化:

$$r_{ij} = \frac{\min(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jn})}{x_{ij}} \quad (3)$$

固定型筛选指标的评价值不宜过高也不宜过低,其评价标准只能用区间数 $a = [a^-, a^+]$ 的形式来表示。为了对这类筛选指标进行规范化,需要先求出其理想值。由独立同分布的中心极限定理和德

·莫佛拉斯定理可知,如果式(1)中的置信度足够高,则用区间数 $a = [a^-, a^+]$ 表示的筛选指标评价标准中值就等于该筛选指标的理想值。因此,用区间数表示的筛选指标的理想值可表示为

$$a_j = a^- + \frac{a^+ - a^-}{2} \quad (4)$$

由模糊数学的绝对比较可知 $\frac{|x_{ij} - a_j|}{a_j}$ 衡量了筛选指标 x_{ij} 与该筛选指标的理想值 a_j 之间的偏离程度。偏离程度越大则相对优属度越小,偏离程度越小相对优属度越大,利用数学归纳与演绎的方法可以得出固定型筛选指标的相对优属度等于 1 与 x_{ij} 和 a_j 之间偏离程度的差。因此,可用下式对固定型筛选指标进行规范化:

$$r_{ij} = 1 - \frac{|x_{ij} - a_j|}{a_j} \quad (5)$$

对于效益型筛选指标用下式进行规范化:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})} \quad (6)$$

综合上述公式得到的候选油藏筛选指标相对优属度矩阵 $R^{[13]}$ 为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (7)$$

R 中任一元素 r_{ij} 表示候选油藏 A_j 的第 i 个筛选指标的相对优属度,其中 $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ 。

3.2 筛选指标权重的确定

同一油藏的不同参数对注 CO₂ 混相驱油效果的影响是不同的,有的参数变化可能引起驱油效果和原油采收率的大幅改变^[13],而另一些参数的变化可能对驱油效果和原油采收率影响不大。因此,在建立注 CO₂ 混相驱候选油藏筛选模型之前,必须确定同一油藏各筛选指标的权重。本文中采用模糊层次分析法(FAHP)来确定筛选指标的权重。

依据模糊数量标度表建立模糊一致判断矩阵 R ,即

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} = (r_{ij}) \quad (8)$$

此时可用下式^[14]来求取筛选指标的权重:

$$w_i = \frac{1}{n} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{na} \sum_{k=1}^n r_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

式中, a 为对所感知对象的差异程度的一种度量(通常 $a = \frac{n-1}{2}$)。

3.3 区间数注 CO₂ 混相驱油藏筛选模型的建立

设 x 为每一候选油藏的 m 个筛选指标组成的论域,

$$x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\} \quad (10)$$

式中, x_i 为候选油藏的筛选指标; $i = 1, 2, \dots, m$ 。

A 为全体候选油藏组成的候选油藏集,

$$A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_n\} \quad (11)$$

式中, A_j 为候选油藏且是 x 上的模糊子集; $j = 1, 2, \dots, n$ 。

设 G 为 x 上的模糊最优子集,则

$$u_j(A_j, G) = \frac{1}{1 + \left[\sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{1}{m} \right) w_i r_{ij} \right]^2} \quad (12)$$

式中, u_j 为 A_j 相对于最优方案 G 取海明权距离时的方案优属度。

式(12)即为区间数注 CO₂ 混相驱油藏筛选模型。

4 实例应用

为了验证本文中所建立的筛选方法的准确性和可靠性,通过对国内外注 CO₂ 混相驱油藏的分析 and 对比,选择了美国加利福尼亚州 6 个典型的注 CO₂ 混相驱的油藏进行实例验证,这些油藏的筛选指标如表 4 所示。

由区间数注 CO₂ 混相驱油藏筛选模型得到美国加利福尼亚州 6 个注 CO₂ 混相驱油藏的综合评价结果为

$$u_j = (0.8903, 0.8155, 0.9238, 0.6213, 0.8463, 0.8627)$$

由此可知美国加利福尼亚州 6 个注 CO₂ 混相驱油藏的开发潜力从大到小的顺序为: Gatchell, Emery, Osborne, Potrero, Stevens, Westem21。

候选油藏 Emery, Stevens, Gatchell, Westem21, Potrero, Osborne 的最终采收率分别为 44.7%, 33.1%, 58.5%, 21.3%, 36.7%, 44.3%。

这也与各个油藏的实际开发情况相吻合,筛选结果最优的 Gatchell 油藏位于 Coalinga Nose 油田,重力驱油效果非常出色,最终采收率达 58.5%;而筛选结果最差的 Westem21 油藏其砂岩储层的非均质性和横向连续性降低了采收率。

表 4 注 CO₂油藏筛选指标^[3,15]

油藏名称	有效孔隙度 $e/\%$	渗透率 $k/10^{-3}\mu\text{m}^2$	润湿性	非均质性	油藏温度 $t/^\circ\text{C}$	油层压力 p/MPa	油藏倾角 $/^\circ$	油藏深度 H/m	储层厚度 h/m	原油粘度 $\mu/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	原油密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	原油饱和度 $S_o/\%$
Emery	26.5	83	0.58	0.52	85	17.7	32	1615	92.3	1.05	0.8602	63
Stevens	22	200	0.43	0.63	98.8	24.2	13	2499	33.5	0.37	0.8398	62
Gatchell	15	421	0.78	0.46	100	23.7	35	2286	117.6	0.65	0.8660	72.3
Westem21	19.5	108	0.38	0.64	112.7	27	7	2682	94.2	0.45	0.8550	53
Potero	18	75	0.52	0.60	76.6	21.1	9	2134	58.5	0.72	0.8498	70
Osborne	22.4	500	0.55	0.51	121.1	34	28	3475	40.8	0.2	0.8299	65.9

5 结 论

(1) 采用区间数对注 CO₂ 油藏进行筛选, 客观地反映了地层的真实情况, 降低了油藏筛选的盲目性, 提高了油藏筛选的准确性。

(2) 该方法将注 CO₂ 混相驱开发过程中的各种模糊和主观因素转化为数学形式, 既考虑了注 CO₂ 混相驱油藏开发中各种影响因素的复杂性, 又考虑了各种因素的模糊性, 使候选油藏的筛选得到了简化。

(3) 选取的筛选指标和提出的评价标准是合理、可靠的, 能够客观地评估油藏注 CO₂ 潜力。

(4) 该方法可推广应用于其他油藏的筛选, 具有一定的推广价值和应用前景。

参考文献:

- [1] 杨道永, 张琪. 混相驱中的气体示踪剂监测技术 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1999, 23(3): 37-40
YANG Dao-yong, ZHANG Qi. Gas tracer technology for miscible flooding reservoir [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1999, 23(3): 37-40
- [2] GUNTIS Moritis. EOR oil production up slightly [J]. Oil & Gas Journal, 1998, 96(16): 49-77.
- [3] 郑云川. 注气提高采收率候选油藏筛选方法及其应用研究 [D]. 南充: 西南石油学院, 2003.
- [4] 熊钰, 孙良田, 孙雷, 等. 基于模糊层次分析法的注 CO₂ 混相驱油藏综合评价方法 [J]. 石油学报, 2002, 23(6): 60-63
XDNG Yu, SUN Liang-tian, SUN Lei, et al. A new integrative evaluation way for candidate of carbon dioxide miscible flooding reservoirs based on fuzzy analytical hierarchy process [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(6): 60-63
- [5] RIVAS Ombid S. Ranking reservoirs for CO₂ flooding processes [R]. SPE 23641, 1992.
- [6] DANIEL Diaz. Screening criteria for application of carbon dioxide miscible displacement in water flooded reservoirs containing light oil [R]. SPE/DPE 35431, 1996.
- [7] THOMAS. Proposed screening criteria for gas injection evaluation [J]. JCPT, 1998, 37(11): 14-20.
- [8] 李士伦, 郭平, 戴磊, 等. 发展注气提高采收率技术 [J]. 西南石油学院学报, 2000, 22(3): 41-46
LI Shi-lun, GUO Ping, DAILEI, et al. Proceedings of gas injection on improved oil recovery [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2000, 22(3): 41-46
- [9] ALLISON SB, OMOREGIE Z S. Analysis of field tracers for reservoir description [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1991(5): 173-186.
- [10] 游秀玲, 张玲, 罗云秀. 原油采收率影响因素探讨及油藏综合分类 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 314-318
YOU Xiu-ling, ZHANG Ling, LUO Yun-xiu. Factors influencing oil recovery efficiency and comprehensive classification of oil reservoirs [J]. Oil and Gas Geology, 2004, 25(3): 314-318
- [11] 龚承林, 雷怀彦, 官宝聪. 混相驱气体示踪剂的筛选新方法 [J]. 天然气地球科学, 2007, 18(5): 767-770
GONG Cheng-lin, LEI Huai-yan, GUAN Bao-cong. New screening method for gas tracer in miscible flooding [J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(5): 767-770.
- [12] KLEVEN R, ANDERSON J H. Non-radioactive tracking of injection gas in reservoirs [R]. SPE 35651, 1996.
- [13] BOTBOL J M, LU J. A regionalized multivariate approach to target selection in geochemical exploration [J]. Economic Geology, 1978, 73(4): 534-546.
- [14] 李向良. 大芦湖油田樊 124 断块 CO₂ 混相驱过程中沥青质沉淀实验研究 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2006, 30(2): 64-68
LIXiang-liang. Experimental studies on asphaltene precipitation with CO₂ miscible flooding in Fan 124 block of Daluhu Oilfield [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(2): 64-68
- [15] 郑云川, 熊钰, 侯天江, 等. 注气候选油藏筛选的模糊优选方法 [J]. 西南石油学院学报, 2005, 27(1): 44-47.
ZHENG Yun-chuan, XDNG Yu, HOU Tian-jiang, et al. Screening method based on fuzzy optimum for gas injection in candidate reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2005, 27(1): 44-47.

(编辑 沈玉英)