

引用格式:曲丽丽,李明林,伍志敏,等.未确知测度模型在南堡H断块油层潜力评价中的应用[J].油气藏评价与开发,2023,13(2):190-199.

QU Lili, LI Minglin, WU Zhimin, et al. Application of unascertained measure model in reservoir potential evaluation of Nanpu H Fault Block[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(2): 190-199.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.02.007

未确知测度模型在南堡H断块油层潜力评价中的应用

曲丽丽,李明林,伍志敏,张林,冯林平,邓丽萍

(中国石油冀东油田公司南堡油田作业区,河北唐山063200)

摘要:如何准确评价当前油层潜力直接影响着开发中后期复杂断块注水油藏剩余油的挖潜工作。通过静态油藏地质特征与动态开发效果综合分析,确定了复杂断块油藏剩余油分布的主控因素,并利用基于未确知数学理论和属性测度理论的层次分析+未确知测度评价方法进行油层潜力评价。通过构建评价指标体系,建立精确的未确知测度函数,利用置信度识别准则判定评价空间,最终得到油层潜力评价结果。研究结果表明:利用层次分析+未确知测度综合评价油层潜力,建立了7个参数组成的评价体系并构建未确知测度函数,根据油藏潜力大小可将油层分为4类,其中,I、II类油层潜力较好,评价结果与数模结果相似,并通过现场实施验证评价结果的可靠性。

关键词:动静结合;剩余油;层次分析法;未确知测度;油层潜力评价

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Application of unascertained measure model in reservoir potential evaluation of Nanpu H Fault Block

QU Lili, LI Minglin, WU Zhimin, ZHANG Lin, FENG Linping, DENG Liping

(Nanpu Oilfield Operation Area of PetroChina Jidong Oilfield Company, Tangshan, Hebei 063200, China)

Abstract: How to accurately evaluate the current reservoir potential directly affects the potential tapping of remaining oil by water injection in complex fault block reservoirs during the middle and late stages of development. By the comprehensive analysis of static reservoir geological characteristics and dynamic development effects, the main control factors of residual oil distribution in complex fault block reservoirs are determined, and the reservoir potential is evaluated by the analytic hierarchy process combined with unascertained measure evaluation method based on unascertained mathematical theory and attribute measurement theory. An accurate unascertained measure function is established by building an evaluation index system, and by the confidence degree identification criteria to determine the evaluation space, the evaluation result of reservoir potential is finally obtained. The research results show that the reservoir potential is comprehensively evaluated by using the analytic hierarchy process and unascertained measurement, the evaluation system consisting of seven parameters is established and the unascertained measurement function is constructed. According to the reservoir potential, the reservoirs can be divided into four categories, of which category I and category II have good potential. The evaluation results are similar to the numerical simulation results, and the reliability of the evaluation results is verified by the on-site implementation.

Keywords: static and dynamic combination analysis; remaining oil; analytic hierarchy process; uncertainty measure; reservoir potential evaluation

南堡油田H断块油气资源丰富,储层非均质性强,属于中孔、中渗复杂断块油气藏,目前已进入中含水阶段,含水上升率不断增大,剩余油识别难度

大。准确的油层潜力综合评价结果为油藏高效开发提供重要依据,是现阶段开发管理的主要任务^[1-4],而油层潜力综合评价方法的选取对油藏综合评价研

收稿日期:2022-10-31。

第一作者简介:曲丽丽(1988—),女,硕士,工程师,从事油气田开发、储层地质学及油藏描述等研究。地址:河北省唐山市曹妃甸区汇丰路47号,邮政编码:063200。E-mail: qulili0620@126.com

通信作者简介:李明林(1990—),男,本科,工程师,从事油气田开发研究。地址:河北省唐山市曹妃甸区汇丰路47号,邮政编码:063200。E-mail: 841401307@qq.com

究至关重要。

油层潜力综合评价直接影响后期开发调整策略,目前模糊数学、聚类分析、灰色理论等方法被应用于油层评价且效果良好^[5-7],但仍具有很大的片面性、主观性。

研究区油层潜力大小与多种因素有关,仅从单一因素分析,不能完全判定油层潜力大小,必须结合多因素综合考虑,且多参数互相影响,油水井间存在很多不确定信息,加大了综合评价的难度。考虑到油层潜力主要取决于剩余油丰度,而剩余油分布规律受多种因素影响,认识难度大、多解性强,说明油层潜力评价是一个涉及多目标多指标不确定问题的决策过程,存在极大的不确定性。因此,研究在决策过程中引入未确知数学理论^[8-10],建立未确知测度模型进行油层综合潜力评价。该理论已广泛应用于社会、自然科学中^[11-14],但在油田开发领域,尤其在油层潜力评价方面应用较少。采用层次分析法和未确知测度优化结合^[15-16],构建综合评价模型,提高综合评价准确性,提高油藏认识和管理水平,实现有效评价油藏、高效治理油藏。该评价方法对提高其他同类型油藏中油层潜力评价的准确性具有一定借鉴和参考价值。

1 研究区概况

南堡油田H断块是南堡油田一号构造带上由西北向东南倾斜的断斜构造,主要含油层段为东营组东一段储层,母岩区主要为南部的沙垒田凸起,沉积过程中发育多次进积、退积,呈现多期扇体叠加的典型特征,主要发育辫状河三角洲前缘亚相,储层非均质性强。储层平均孔隙度为22.4%,平均渗透率为 $134.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于中孔、中渗油藏。2017年注水开发至今,综合含水42%,累计注采比为0.8,地质储量采出程度为22%。由于天然能量不足,采用反7点法不规则井网注水开发,平均井距介于180~300 m。由于储层非均质性强,油井受控、受效差别大,主体区产量较高,边部区域产量相对较低。

2 层次分析+未确知测度评价模型

2.1 单指标未确知测度确定

已知 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 是 n 个样本点,设 $X=\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 为未确知测度的对象空间。依据评价内容

优选评价参数指标 I_1, I_2, \dots, I_n ,建立评价参数体系的指标空间记作 $I=\{I_1, I_2, I_3, \dots, I_n\}$ 。设 x_{ij} 表示 x_i 关于 I_j 的监测值,对 x_{ij} 有 k 个评价等级,记作 U 为其评价空间,则 $U=\{C_1, C_2, C_3, \dots, C_k\}$,若 C_1 比 C_2 “好”,记作 $C_1 > C_2 > C_3 > C_k$,称 $\{C_1, C_2, C_3, C_4\}$ 是评价空间 U 的一个有序分割类^[5-7]。

设监测值 x_{ij} 属于 C_k 的程度用 $u_{ijk}=u(x_{ij} \in C_k)$ 表示, u 满足:

$$0 \leq u(x_{ij} \in C_k) \leq 1 \quad (1)$$

$$u(x_{ij} \in U) = 1 \quad (2)$$

$$u \left| x_{ij} \in \bigcup_{l=1}^k C_l \right| = \sum_{l=1}^k u(x_{ij} \in C_l) \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, p$ 。

式(1)和式(2)分别表示 u 对评价空间 U 满足归一性和可加性,称满足式(1)、式(2)和式(3)的 u 为未确知测度。

称矩阵 U_{imp} 是 $(u_{ijk})_{m \times p}$ 为 x_i 单指标测度评价矩阵,如式(4)所示^[5-7]。

$$U_{imp} = \begin{bmatrix} U_{i11} & U_{i12} & \dots & U_{i1p} \\ U_{i21} & U_{i22} & \dots & U_{i2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{im1} & U_{im2} & \dots & U_{imp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 。

2.2 层次分析法指标权重确定

根据评价内容及储层潜力影响因素选取不同级别评价参数后,选用具有可靠度较高的层次分析法,建立多级评价参数构架,将复杂问题条理化、简单化^[10, 15-16]。利用0~9标度法,逐级构造由大到小不同级别的两两评价矩阵,确定各级参数权重,最终得到各评价参数及其权重 w_j ($0 \leq w_j \leq 1, \sum w_j = 1$),确保权重客观合理,建立合理的层次分析+未确知测度油层潜力综合评价体系^[17]。

2.3 多指标未确知测度综合评价

根据单因素测度矩阵和指标权重可以求得多指标综合测度,用 $u_{ik} = u(x_i \in c_k)$ 表示样本 x_i 属于 c_k 评价等级的程度,则:

$$u_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j u_{ijk}; 0 \leq u_{ik} \leq 1, \sum_{k=1}^p u_{ik} = 1 \quad (5)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, p$ 。

式(5)确定的 u_{ik} 是未确知测度,式(6)为多指标

综合测度评价矩阵。样本 x_i 的多指标综合测度评价向量为式(6)中第 i 个行向量 $(U_{i1}, U_{i2}, \dots, U_{ip})^{[8]}$ 。

$$(U_{ik})_{n \times p} = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \dots & U_{1p} \\ U_{21} & U_{22} & \dots & U_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{n1} & U_{n2} & \dots & U_{np} \end{bmatrix} \quad (6)$$

依次求得各样本在各个评价等级的隶属度,根据置信度原则,确定各样本的综合评价等级,最后根据经验公式赋值,可将最终得分进行排序^[8]。

3 油层潜力评价

3.1 评价过程

3.1.1 剩余油分布控制因素

储层潜力体现在剩余油富集程度,主要受地质和开发两大因素影响。地质因素主要有构造、沉积、储层非均质性和物质基础;开发因素主要有开采情况和能量补给。储层非均质性是控制剩余油分布的主要因素,表现为储层砂体规模大小、几何形态、连续性和砂体内物性、含油性等参数的分布所引起的平面非均质性影响剩余油平面富集状态。平面上注水驱替绕过低渗区,水驱油效果变差,形成水洗程度较弱的剩余油;各单砂层厚度、物性等差别所引起的层间非均质性,导致纵向上不同小层剩余油富集程度不同物性差的小层水洗程度弱。主力层原始储量丰厚,仍有大量剩余油富集。研究区水下分流河道较为发育,正韵律及复合韵律占比80%,河道正韵律底部物性较好,注入水沿底部突进快,水淹严重,含水率上升快,而顶部物性相对较差,水淹效果差,剩余油相对富集。

从沉积相带对注水开发影响(表1)可以看出,研究区沉积相带控制油气水的运动方向,进而控制剩

余油分布。当油水井都位于河道相带时,顺物源方向的压力传导速度较快,而垂物源方向的压力传导速度相对较慢,油水井间有一定的剩余油富集。

同时,注采开发过程中,由于层系组合、井网部署、射孔方案、注采对应、注采强度、注入倍数等因素的影响,致使由采油井或注水井与采油井所建立的生产方式未波及或波及较小的区域,原油未动用或动用程度低,从而形成剩余油富集区。总体来看,研究区剩余油分布主要受沉积、非均质性、构造、开发等因素影响,油层潜力较好的区域与优势沉积相带、构造、注水受效区具有较好的相关性。

3.1.2 单指标测度函数构建

根据综合评价参数体系需具备整体指标系统性、指标可量化、定性指标和定量指标相结合、指标互补性、相关性强等原则,结合剩余油影响因素及表征油藏潜力的一些开发指标,从油藏潜力表征指标及控制因素等多种参数中优选综合评价参数^[18-22]。

地质因素中存在多因素互相影响的现象,但其对剩余油的控制作用又不完全一致。储层非均质性主要受沉积作用影响,其物性特征对研究区剩余油控制具备显著作用,同时沉积微相在砂体连通、注水水驱速度、井网等不同方面也影响了剩余油的分布。故同时选取沉积微相和物性特征这两个参数作为评价参数,以表征油藏开发潜力,但在权重赋值的时候考虑到二者的叠加作用,对其权重比例适当减小。开发因素及开发指标可直接用于油藏潜力的表征,如综合含水和采出程度等因素具备样品数多,数据便于采集等优势,可以用于油层潜力综合评价^[23-25]。

最终选取4个地质因素(微构造、沉积微相、渗透率、有效厚度)和3个开发因素(含水、采出程度、压力系数)共7个参数组成评价参数体系。据现有油层分

表1 沉积相带对注水开发影响
Table 1 Impact of sedimentary facies belt on water injection development

| 注采相带 | 统计井数 (口) | 见效井数 (口) | 见效比例 (%) | 平均井距 (m) | 见效时间 (d) | 见水时间 (d) | 压力传导速度 (m/d) |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|
| 河道注水河道见效(顺物源) | 10 | 8 | 80.0 | 266 | 162 | 566 | 1.64 |
| 河道注水河道见效(垂物源) | 10 | 6 | 60.0 | 247 | 201 | 697 | 1.23 |
| 河道注水河道见效(与物源方向相反) | 10 | 7 | 70.0 | 268 | 180 | 568 | 1.49 |
| 河道注水侧缘见效 | 8 | 2 | 25.0 | 257 | 287 | 837 | 0.90 |
| 侧缘注水河道见效 | 8 | 4 | 50.0 | 243 | 307 | 987 | 0.79 |
| 侧缘注水侧缘见效 | 6 | 2 | 33.3 | 244 | 388 | 未见水 | 0.63 |

类标准及研究区油层参数特征,将油层潜力分为4个等级,建立潜力综合评价单因素标准^[9-10](表1)。

未确知测度综合评价模型的最根本点是测度函数的构造^[4]。采用未确知测度函数计算各个因素所处等级的可能性,求取各测值的单指标测度。根据南堡油田H断块油层单因素等级评价标准(表2),将油层潜力划分为4个等级,利用梯形法构建各单指标的未确知测度隶属函数(图1),其中, C_1 ={油层潜力好}, C_2 ={油层潜力较好}, C_3 ={油层潜力一般}, C_4 ={油层潜力差}。根据各指标权重系数及单指标测度函数,对Ed₁Ⅱ②2小层各油井进行单指标测度判定,得到多指标综合评价矩阵,利用式(12)评定测点 x_i ($i=1,2,\dots,n$)的值,得到此次综合评价结果。

以渗透率参数 k 为例,根据研究区储层渗透率介于 $(0\sim 500)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $134.6\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 等物性分布特征建立渗透率划分标准,并划分4个评价等级。当 $k\geq 220\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 时属于 C_1 级,即储层潜力大,为I类储层;当 $80\times 10^{-3}\mu\text{m}^2\leq k\leq 180\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 时属于 C_2 级,即储层潜力较大,为II类储层;当 $30\times 10^{-3}\mu\text{m}^2\leq k\leq 70\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 时属于 C_3 级,为III类储层;当 $k\leq 30\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 时属于 C_4 级,为IV类储层。受未确知因素影响,在临界值附近参数属于哪一级别并不确定:设 $k=200\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 时,属于 C_1 或者 C_2 的程度均为0.5,在 $200\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 附近的储层参数利用单指标未确知测度数学函数确定属于 C_1 或者 C_2 的程度,逐个构建不同分级未确知测度函数方程如下。

构建 C_1 函数为:

$$\begin{cases} y_1 = 1 & (k \geq 220 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \\ y_1 = 0.5 + 0.025(x - 200) & (180 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < k < 220 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \\ y_1 = 0 & (k \leq 180 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \end{cases} \quad (7)$$

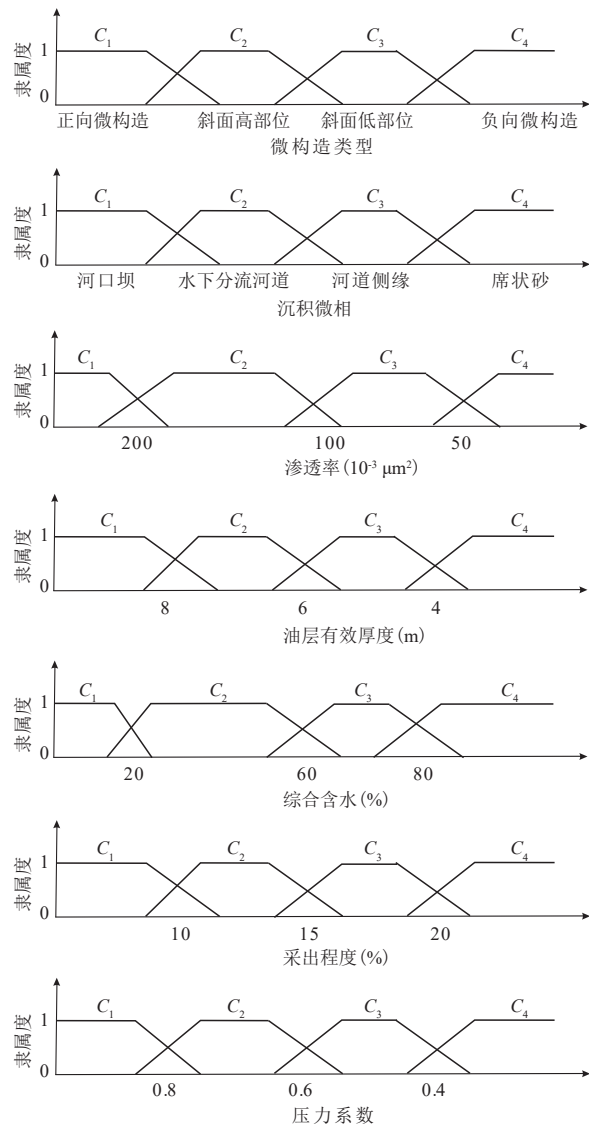


图1 南堡油田H断块单指标的测度函数

Fig. 1 Measurement function of single index in Block H of Nanpu Oilfield

表2 南堡油田H断块油层单因素评价标准

Table 2 Single factor evaluation criteria for oil layers in Block H of Nanpu Oilfield

| 影响因素 | | 评价等级 | | | | |
|------|------|-------------------------------|-------|---------|---------|-------|
| | | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | |
| 地质因素 | 构造特征 | 微构造类型 | 正向微构造 | 斜面高部位 | 斜面低部位 | 负向微构造 |
| | 沉积特征 | 沉积微相 | 河口坝 | 水下分流河道 | 河道侧缘 | 席状砂 |
| | 物性特征 | 渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$) | > 200 | 100~200 | 100~50 | < 50 |
| | 物质基础 | 油层有效油厚(m) | > 8 | 6~8 | 4~6 | < 4 |
| 开发因素 | 开采情况 | 综合含水(%) | < 20 | 20~60 | 60~80 | > 80 |
| | | 采出程度(%) | < 10 | 10~15 | 15~20 | > 20 |
| | 能量补给 | 压力系数 | > 0.8 | 0.6~0.8 | 0.4~0.6 | < 0.4 |

构建 C_2 函数为:

$$\begin{cases} y_2 = 0.5 + 0.025(200 - x) \\ \quad (180 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < k < 220 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \\ y_2 = 1 \quad (120 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \leq k \leq 180 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \\ y_2 = 0.5 + 0.025(x - 100) \\ \quad (80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < k < 120 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \\ y_2 = 0 \quad (k \geq 220 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \text{ 或 } k \leq 80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \end{cases} \quad (8)$$

构建 C_3 函数为:

$$\begin{cases} y_3 = 0.5 + 0.025(100 - x) \\ \quad (80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < k < 120 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \\ y_3 = 1 \quad (70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \leq k \leq 80 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \\ y_3 = 0.5 + 0.025(x - 50) \\ \quad (30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < k < 70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \\ y_3 = 0 \quad (k \geq 120 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \text{ 或 } k \leq 30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \end{cases} \quad (9)$$

构建 C_4 函数为:

$$\begin{cases} y_4 = 0.5 + 0.025(50 - x) \\ \quad (30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < k < 70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \\ y_4 = 1 \quad (k \leq 30 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \\ y_4 = 0 \quad (k \geq 70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2) \end{cases} \quad (10)$$

根据式(7)一式(10),构建渗透率单指标未确知测度函数(图2)。

设 $k=200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 可得此时 k 的单指标隶属度函数为 $u_k=(0.5, 0.5, 0, 0)$, 属于 C_1 的程度为 0.5, 属于 C_2 的程度为 0.5, 属于 C_3 的程度为 0, 属于 C_4 的程度为 0; 设 $k=150 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 可得此时 k 属于 C_k 的程度为 $u_k=(0, 1, 0, 0)$, 属于 C_1 的程度为 0, 属于 C_2 的程度为 1, 属于 C_3 的程度为 0, 属于 C_4 的程度为 0; 设 $k=40 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 可得此时 k 属于 C_k 的程度为 $u_k=(0, 0, 0.25, 0.75)$; 根据储层分类标准, 依次构建其他单指标测度函数(图2)。

3.1.3 评价指标权重确定

结合研究区东一段油层特征及开发潜力主控因

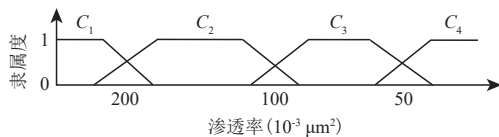


图2 南堡油田H断块渗透率的测度函数

Fig. 2 Measuring function of permeability in Block H of Nanpu Oilfield

素,采用两级评价参数体系,构建适合研究区油层潜力评价的递阶层次指标评价体系。考虑到地质因素互相影响,各指标之间有一定的关联性。构造和沉积作用控制储层物性和有效厚度,影响油层开发后剩余油赋存状态。同时,物性及有效厚度受沉积和构造作用、成藏过程成岩作用、物质基础以及开发过程影响油层不断变化等多因素影响,因此,在层次分析法确定权重时适当减少构造和沉积的权重比例,避免地质因素的重复影响。通过逐级建立两两比较矩阵,并计算各因素的权重大小,通过一致性和随机性检验后,得到各因素权重,由此可得各类、各项影响因素指标的两级权重分配,求得此次评价体系中各个因素所占权重(表3—表5)。

一级参数权重 $w_1=($ 地质因素,开发因素) $= (0.6, 0.4)$ 。

二级参数权重 $w_{21}=($ 微构造,沉积微相,渗透率,有效厚度) $= (0.13, 0.13, 0.24, 0.5)$; $w_{22}=($ 采出程度,含水,压力系数) $= (0.25, 0.25, 0.5)$ 。

通过逐级计算,最终所得各评价参数权重如下:

表3 一级参数两两比较矩阵
Table 3 First level parameter pairwise comparison matrix

| 一级参数 | 地质因素 | 开发因素 |
|------|------|------|
| 地质因素 | 1 | 3/2 |
| 开发因素 | 2/3 | 1 |

表4 地质因素中二级参数两两比较矩阵
Table 4 Pairwise comparison matrix of secondary parameters of geological factors

| 二级参数 | 微构造 | 沉积微相 | 渗透率 | 有效厚度 |
|------|-----|------|-----|------|
| 微构造 | 1 | 1 | 1/2 | 1/4 |
| 沉积微相 | 1 | 1 | 1/2 | 1/4 |
| 渗透率 | 2 | 2 | 1 | 1/3 |
| 有效厚度 | 4 | 4 | 3 | 1 |

表5 开发因素中二级参数两两比较矩阵
Table 5 Pairwise comparison matrix of secondary parameters in development factors

| 二级参数 | 采出程度 | 含水 | 压力系数 |
|------|------|----|------|
| 采出程度 | 1 | 1 | 1/2 |
| 含水 | 1 | 1 | 1/2 |
| 压力系数 | 2 | 2 | 1 |

$w=(\text{微构造,沉积微相,渗透率,有效厚度,采出程度,含水,压力系数})=(0.078, 0.078, 0.144, 0.3, 0.1, 0.1, 0.2)$ 。

3.1.4 多指标评价矩阵确定及置信度识别

通过层次分析+未确知测度模型建立单指标矩阵和权重向量,求取多指标评价矩阵:

| | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|
| W1 | 0.461 | 0.194 | 0.194 | 0.150 |
| W2 | 0.243 | 0.193 | 0.392 | 0.272 |
| W3 | 0.305 | 0.124 | 0.146 | 0.425 |
| W4 | 0.181 | 0.123 | 0.265 | 0.431 |
| W5 | 0.226 | 0.158 | 0.359 | 0.256 |
| W6 | 0.304 | 0.019 | 0.147 | 0.530 |
| W7 | 0.473 | 0.194 | 0.185 | 0.147 |
| W8 | 0.401 | 0.009 | 0.223 | 0.366 |
| W9 | 0.284 | 0.218 | 0.167 | 0.330 |
| W10 | 0.419 | 0.243 | 0.185 | 0.153 |
| W11 | 0.359 | 0.051 | 0.447 | 0.143 |
| W12 | 0.303 | 0.168 | 0.432 | 0.097 |
| W13 | 0.545 | 0.043 | 0.000 | 0.412 |
| W14 | 0.481 | 0.194 | 0.174 | 0.150 |
| W15 | 0.232 | 0.229 | 0.495 | 0.043 |
| W16 | 0.386 | 0.148 | 0.412 | 0.054 |
| W17 | 0.187 | 0.574 | 0.239 | 0.000 |
| W18 | 0.303 | 0.018 | 0.149 | 0.530 |
| W19 | 0.429 | 0.067 | 0.104 | 0.400 |
| W20 | 0.358 | 0.463 | 0.050 | 0.128 |
| W21 | 0.338 | 0.554 | 0.043 | 0.064 |
| W22 | 0.401 | 0.400 | 0.198 | 0.000 |
| W23 | 0.319 | 0.143 | 0.385 | 0.153 |
| W24 | 0.213 | 0.193 | 0.442 | 0.152 |
| W25 | 0.580 | 0.332 | 0.000 | 0.107 |
| W26 | 0.588 | 0.312 | 0.060 | 0.040 |
| W27 | 0.590 | 0.363 | 0.046 | 0.000 |
| W28 | 0.336 | 0.554 | 0.043 | 0.066 |
| W29 | 0.736 | 0.263 | 0.000 | 0.000 |
| W30 | 0.439 | 0.067 | 0.104 | 0.389 |
| W31 | 0.296 | 0.038 | 0.239 | 0.427 |
| W32 | 0.358 | 0.051 | 0.457 | 0.135 |

(11)

由于 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 引入置信度识别准则, 设 λ 为置信度 ($\lambda \geq 0.5$), 若 $k_0 = \min \left(k: \sum_{l=1}^k u_{il} \geq \lambda, 1 \leq l \leq k \right)$, 可以判断 x_i 属于 C_l 。根据置信度原则, 设置 $\lambda=0.58$, 假设 $k_0=u_{i1}+u_{i2}=0.61$, 此时 k_0 大于 0.6, 属于 C_2 。以 W7 井为例, $k_0=0.473+0.194$, 大于 0.58, 属于 II 类储层(表6)。

除了要判别 x_i 属于哪个评价等级外, 有时要求对

x_i 的重要程度排出顺序。若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 令 C_l 的分值为 n_l , 则 $n_l > n_{l+1}$, 利用式(12)计算每个样本的得分, 并对其进行排序。 q_{x_i} 为评价因素 x_i 的未确知重要度, 称 $\{q=q_{x_1}, q_{x_2}, \dots, q_{x_p}\}$ 为未确知重要度向量, 可按 q_{x_i} 的大小对 x_i 的活动性重要区进行排序。

$$q_{x_i} = \frac{\sum_{l=1}^p n_l u_{il}}{n} \quad (i = 1, 2, \dots, n; n_k > n_{k+1}; n_k = n + 1 - l) \quad (12)$$

式中: n_l 为 C_l 的分值; u_{il} 为样本 x_i 属于 C_k 评价等级的程度。

根据式(7)可得 W7 井的未确知重要度为 $q_{w7}, q_{w7} = (4 \times 0.473 + 3 \times 0.194 + 2 \times 0.185 + 1 \times 0.147) / 4 = 0.75$, W7 井油层综合潜力排序第 10。

3.2 评价结果及验证

3.2.1 评价结果

根据多指标评价矩阵计算含油面积内 32 口油井综合治理潜力, 其中 I 类储层 4 个, II 类储层 11 个, III 类储层 12 个, IV 类储层 5 个。其中 I 类、II 类储层油层潜力较大, 为后期开发潜力区。

利用式(12)计算并统计 Ed₁ II ②2 小层中各油井油层潜力得分并进行综合排序, 如根据计算结果得到油层质量从优到差排序依次为 W29>W27>W26>.....>W4(表6), 综合治理时可根据油层目前综合质量排序依次择优挖潜。

根据水井注水量将 17 口水井区域赋值介于 0~0.5, 注水量越大, 近井地带剩余油越少, 数值越小。设 $q_{wwi} = (1 - \text{单井累注水量} / \text{断块总注水量}) \times 0.5$, 根据各井所得分数绘制油层潜力综合评价结果(图3)。

3.2.2 结果验证

通过对比数值模拟结果及矿场实践应用证明, 利用层次分析+未确知测度综合评价方法评价油层潜力结果与数值模拟结果相似, 通过矿场措施实践证明措施有效率为 90%, 说明此方法准确率较高。未确知测度模型的应用, 可通过多井综合评价, 无须地质模型的建立优化和数模模拟过程, 直接将地质研究成果应用于油藏潜力评价, 评价结果可直接应用于寻找油藏潜力较大的剩余油富集区带, 及时优化调整开发措施及方案, 简单易行且具有良好效果。

评价结果显示, 不同区域所受主要影响因素不同, 高部位及低部位微构造起伏区域受地质因素影响

表6 南堡油田H断块Ed₁II②2小层综合评价结果
Table 6 Comprehensive evaluation results of sublayer Ed₁II②2 of Block H in Nanpu Oilfield

| 井号 | C ₁ | C ₂ | C ₃ | C ₄ | 储层等级 | 分数 | 排序 |
|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|------|------|----|
| W29 | 0.736 | 0.263 | 0 | 0 | I | 0.93 | 1 |
| W27 | 0.590 | 0.363 | 0.046 | 0 | I | 0.89 | 2 |
| W26 | 0.588 | 0.312 | 0.060 | 0.040 | I | 0.86 | 3 |
| W25 | 0.580 | 0.332 | 0 | 0.107 | I | 0.86 | 4 |
| W22 | 0.401 | 0.400 | 0.198 | 0 | II | 0.80 | 5 |
| W21 | 0.338 | 0.554 | 0.043 | 0.064 | II | 0.79 | 6 |
| W28 | 0.336 | 0.554 | 0.043 | 0.066 | II | 0.79 | 7 |
| W20 | 0.358 | 0.463 | 0.050 | 0.128 | II | 0.76 | 8 |
| W14 | 0.481 | 0.194 | 0.174 | 0.150 | II | 0.75 | 9 |
| W7 | 0.473 | 0.194 | 0.185 | 0.147 | II | 0.75 | 10 |
| W1 | 0.461 | 0.194 | 0.194 | 0.150 | II | 0.74 | 11 |
| W17 | 0.187 | 0.574 | 0.239 | 0 | II | 0.74 | 12 |
| W10 | 0.419 | 0.243 | 0.185 | 0.153 | II | 0.73 | 13 |
| W16 | 0.386 | 0.148 | 0.412 | 0.054 | III | 0.72 | 14 |
| W13 | 0.545 | 0.043 | 0 | 0.412 | II | 0.68 | 15 |
| W12 | 0.303 | 0.168 | 0.432 | 0.097 | III | 0.67 | 16 |
| W15 | 0.232 | 0.229 | 0.495 | 0.043 | II | 0.66 | 17 |
| W32 | 0.358 | 0.051 | 0.457 | 0.135 | III | 0.66 | 18 |
| W11 | 0.359 | 0.051 | 0.447 | 0.143 | III | 0.66 | 19 |
| W23 | 0.319 | 0.143 | 0.385 | 0.153 | III | 0.66 | 20 |
| W2 | 0.243 | 0.193 | 0.392 | 0.272 | III | 0.65 | 21 |
| W30 | 0.439 | 0.067 | 0.104 | 0.389 | III | 0.64 | 22 |
| W19 | 0.429 | 0.067 | 0.104 | 0.400 | III | 0.63 | 23 |
| W24 | 0.213 | 0.193 | 0.442 | 0.152 | III | 0.62 | 24 |
| W9 | 0.284 | 0.218 | 0.167 | 0.330 | III | 0.61 | 25 |
| W8 | 0.401 | 0.009 | 0.223 | 0.366 | III | 0.61 | 26 |
| W5 | 0.226 | 0.158 | 0.359 | 0.256 | III | 0.59 | 27 |
| W3 | 0.305 | 0.124 | 0.146 | 0.425 | IV | 0.58 | 28 |
| W31 | 0.296 | 0.038 | 0.239 | 0.427 | IV | 0.56 | 29 |
| W6 | 0.304 | 0.019 | 0.147 | 0.530 | IV | 0.52 | 30 |
| W18 | 0.303 | 0.018 | 0.149 | 0.530 | IV | 0.52 | 31 |
| W4 | 0.181 | 0.123 | 0.265 | 0.431 | IV | 0.51 | 32 |

较为明显,中部及低部位区域受开发因素较为明显。

1) 数值模拟结果对比

对比数值模拟结果,可见层次分析+未确知测度综合评价储层潜力与数模模拟结果的潜力区一致,说明评价结果可靠(图4)。

2) 矿场应用效果验证

根据评价结果,制定不同类型油层类别综合治理方案: I、II类油层制定的注采完善意见,主要为层系井网完善和补孔、转注、调剖等措施,以提高水驱控制储量、水驱动用程度; III类、IV类油层当前潜力相对小,主要根据其重要影响因素制定治理方

案,地质因素不良的层位以优化改造储层为主,开发因素导致的层位以水井调剖、增注、油井酸化、堵水、回采以及油水井流场调整为主^[22]。依据评价结果制定以油井补孔、压裂、酸化、堵水等措施12井次,措施前日产油21 t,措施后日产油116 t,当年累计增油 3.2×10^4 t,措施有效率91%,说明评价结果具有一定的实用性。

4 结论

1) 评价结果准确与否,关键是评价参数体系构

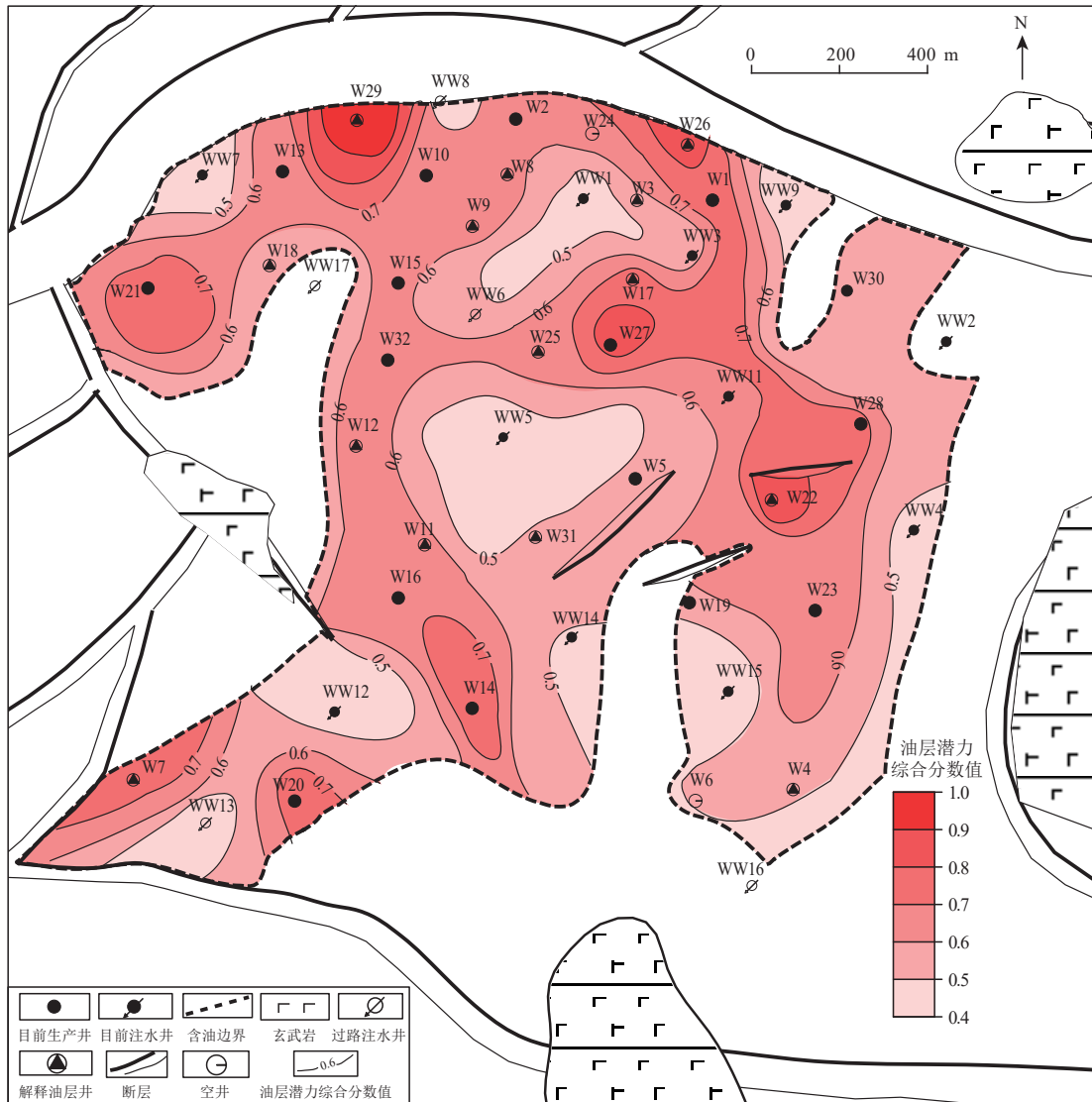


图3 南堡油田H断块油层潜力综合评价结果

Fig. 3 Comprehensive evaluation results of reservoir potential in Block H of Nanpu Oilfield

建,直接影响油层潜力综合评价结果。动静态结合分析油层潜力影响因素,从地质因素和开发因素分别选取7个参数;利用层次分析法确定参数权重,采用未确知测度函数构建隶属度函数,建立合理的评价体系,保证了评价结果的准确性。

2)利用未确知测度评价方法进行油层潜力综合评价,将油层分为四类,其中I类油层、II类油层潜力较好。该模型科学合理,简单易行,并通过矿场应用效果验证了评价结果的可靠性,可广泛应用于油层潜力综合评价。

3)评价方法优势是通过多因素定量评价,能够较准确地预测油层潜力,为实现油层的有效挖潜提

供依据,是一种简单、适用、可靠的方法,具有广泛的适应性和实用性。

参考文献

- [1] 刘宝珺, 谢俊, 张金亮. 我国剩余油技术研究现状与进展[J]. 西部地质, 2004, 37(4): 1-6.
LIU Baojun, XIE Jun, ZHANG Jinliang. Research status and progress of residual oil technology in China[J]. Western Geology, 2004, 37(4): 1-6.
- [2] 李文龙. 密井网区井震结合储层描述方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2016, 35(4): 137-142.
LI Wenlong. Reservoir describing technique by the well-seismic combination for the dense well patterns[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(4): 137-142.
- [3] 林承焰. 剩余油形成与分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1999.

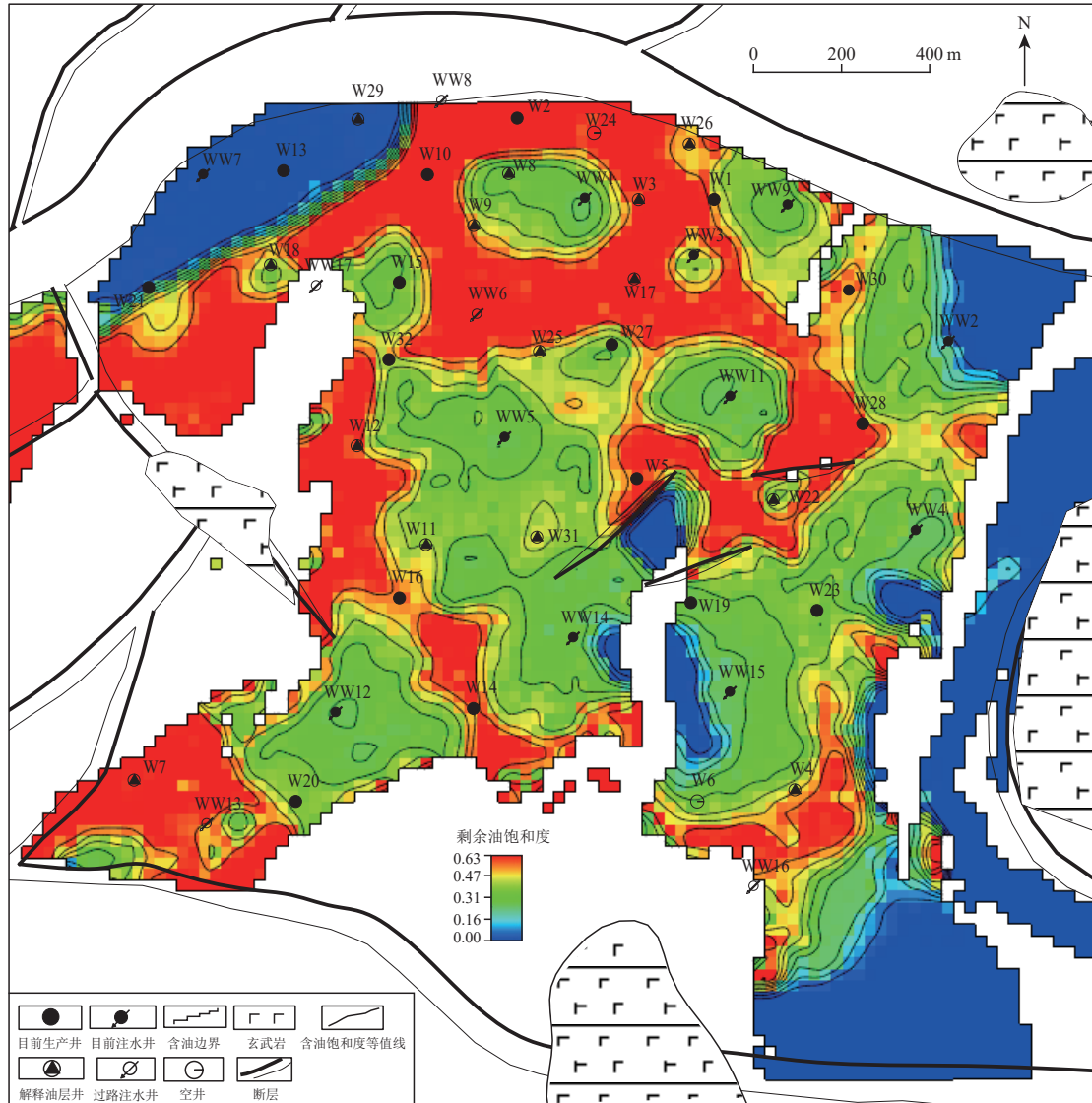


图4 南堡油田H断块剩余油分布

Fig. 4 Residual oil distribution in Block H of Nanpu Oilfield

- LIN Chengyan. Formation and distribution of residual oil[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [4] 毕永斌,张雪娜,马晓丽,等.复杂断块油藏开发潜力分析方法[J].石油地质与工程,2021,35(5):56-61.
- BI Yongbin, ZHANG Xuena, MA Xiaoli, et al. Analysis method of development potential of complex fault block reservoir[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2021, 35(5): 56-61.
- [5] 胡永宏,贺思辉.综合评价方法[M].北京:科学出版社,2000.
- HU Yonghong, HE Sihui. Comprehensive evaluation method [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [6] 王雪铭,吴瑞明.评价方法的发展与体系研究[J].科学技术与工程,2009,9(2):351-352.
- WANG Xueming, WU Ruiming. Research on the development and system of evaluation methods[J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(2): 351-352.
- [7] 杨正明,张英芝,郝明强,等.低渗透油田储层综合评价方法[J].石油学报,2006,27(2):64-67.
- YANG Zhengming, ZHANG Yingzhi, HAO Mingqiang, et al. Comprehensive evaluation method for low permeability reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 27(2): 64-67.
- [8] 刘开第,庞彦军,姚立根,等.大气环境质量评价的未确知测度模型[J].环境科学,2000,21(3):11-15.
- LIU Kaidi, PANG Yanjun, YAO Ligen, et al. Unascertained measurement model for atmospheric environmental quality assessment[J]. Environmental Science, 2000, 21(3): 11-15.
- [9] 刘开第,吴和琴,庞彦军,等.不确定性信息数学处理及应用[M].北京:科学出版社,1999.
- LIU Kaidi, WU Heqin, PANG Yanjun, et al. Mathematics treatment and application of uncertainty information[M]. Beijing: Science Press, 1999.

- [10] 刘开第,吴和琴,王念鹏,等.未确知数学[M].武汉:华中科技大学出版社,1997.
LIU Kaidi, WU Heqin, WANG Nianpeng, et al. Uncertainty mathematics[M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 1997.
- [11] 阳富强,吴超,李孜军.未确知测度模型在矿仓硫精矿自燃危险性评价中的应用[J].煤炭学报,2010,35(2):264-268.
YANG Fuqiang, WU Chao, LI Zijun. Application of unascertained measure model in the risk assessment of spontaneous combustion of sulfur concentrate in mine bin[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 264-268.
- [12] 刘海,陈华.基于层次分析法的未确知测度理论泥石流危险性评价[J].长江流域资源与环境,2012,21(8):1032-1038.
LIU Hai, CHEN Hua. Risk assessment of debris flow based on unascertained measure theory of analytic hierarchy process[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, 21(8): 1032-1038.
- [13] 何虎军,苏生瑞,王孝健.基于未确知测度的崩塌危险性综合评价模型研究及应用[J].中南大学学报(自然科学版),2013,44(3):1564-1570.
HE Hujun, SU Shengrui, WANG Xiaojian. Research and application of comprehensive evaluation model of collapse risk based on unascertained measure[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2013, 44(3): 1564-1570.
- [14] 朱兴琳,方守恩,王俊骅.基于未确知测度理论的高等级公路交通安全评价[J].同济大学学报(自然科学版),2010,38(7):1012-1017.
ZHU Xinglin, FANG Shou'en, WANG Junhua. Traffic safety assessment of high-grade highway based on uncertainty measurement theory[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(7): 1012-1017.
- [15] 程乾生.属性识别理论模型及其应用[J].北京大学学报(自然科学版),1997,33(1):12-20.
CHENG Qiansheng. Theoretical model of attribute recognition and its application[J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 1997, 33(1): 12-20.
- [16] 章志敏,魏翠萍.层次分析若干理论与应用研究[J].曲阜师范大学学报(自然科学版),2013,39(1):37-41.
ZHANG Zhimin, WEI Cuiping. Research on some theories and applications of analytic hierarchy process[J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science Edition), 2013, 39(1): 37-41.
- [17] 林伟强,曲丽丽,朱露,等.井震结合判定井间砂体连通性研究及应用——以南堡油田M区中深层为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):373-381.
LIN Weiqiang, QU Lili, ZHU Lu, et al. Evaluation of inter-well sand body Connectivity by combination of well, seismic, and reservoir and its application: Taking the middle and deep layers of M area of Nanpu Oilfield as an example[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 373-381.
- [18] 黄磊,苟青松,韩莹,等.基于未确知测度理论的含水层富水性评价方法[J].长江科学院院报,2022,39(7):23-28.
HUANG Lei, GOU Qingsong, HAN Xuan, et al. Method of evaluating the water-richness of aquifer based on unascertained measure theory[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(7): 23-28.
- [19] 曾佳龙,刘琼,黄锐,等.基于未确知测度理论的薄基岩厚松散含水层下煤层安全开采区域划定[J].采矿与安全工程学报,2015,32(6):898-904.
ZENG Jialong, LIU Qiong, HUANG Rui, et al. Determination of safe mining area of coal seam under thin bedrock and thick unconsolidated aquifer based on unascertained measure theory [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2015, 32(6): 898-904.
- [20] 单博,陈剑平,王清.基于最小熵理论和未确知测度理论的泥石流敏感性分析[J].岩土力学,2014,35(5):1445-1454.
SHAN Bo, CHEN Jianping, WANG Qing. Sensitivity analysis of debris flow based on minimum entropy theory and unascertained measure theory[J]. Geotechnical Mechanics, 2014, 35(5): 1445-1454.
- [21] 封从军,鲍志东,杨玲,等.三角洲前缘水下分流河道储集层构型及剩余油分布[J].石油勘探与开发,2014,41(3):323-329.
FENG Congjun, BAO Zhidong, YANG Ling, et al. Reservoir configuration and remaining oil distribution of underwater distributary channel in delta front[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 323-329.
- [22] 安玉华,康楠,胡治华,等.基于注采模式的水驱油藏剩余油分布特征[J].石油地质与工程,2022,36(3):74-77.
AN Yuhua, KANG Nan, HU Zhihua, et al. Distribution characteristics of remaining oil in water drive reservoir based on injection-production model[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(3): 74-77.
- [23] 赵伦,梁宏伟,张祥忠,等.砂体构型特征与剩余油分布模式——以哈萨克斯坦南图尔盖盆地 Kumkol South 油田为例[J].石油勘探与开发,2016,43(3):433-441.
ZHAO Lun, LIANG Hongwei, ZHANG Xiangzhong, et al. Sandbody configuration characteristics and remaining oil distribution pattern: Taking Kumkol South Oilfield in South Turgai Basin of Kazakhstan as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 433-441.
- [24] 王锦,冯国奇,王鑫.东营凹陷湖盆陡坡带砂砾岩储层评价方法及应用——以LA区块沙四上亚段为例[J].石油地质与工程,2022,36(3):61-68.
WANG Jin, FENG Guoqi, WANG Xin. Evaluation method and application of glutenite reservoir in steep slope zone of lacustrine basin in Dongying depression: By taking E₂s₄1 in LA block as an example[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(3): 61-68.
- [25] 侯博恒,谢明英,李伟,等.层内纵向强非均质性低渗油藏产能评价方法——以恩平凹陷M油藏为例[J].石油地质与工程,2022,36(5):57-60.
HOU Boheng, XIE Mingying, LI Wei, et al. Productivity evaluation method of strongly longitudinal heterogeneous reservoir within layers: By taking M reservoir of Enping sag as an example[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(5): 57-60.

(编辑 余聪)