

基于模糊评价方法的水驱油藏剩余油表征与预测

贾颖慧¹,赵玉芝²,冉爱华³,王金凯^{1,4},李雨涵¹,谢俊¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院, 河北 任丘 062552;

3. 中国石油华北油田分公司第三采油厂, 河北 沧州 062550;

4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要:对于水驱开发后期的油藏而言,预测剩余油的分布规律,制定合理的剩余油挖潜思路,是提高油藏采收率的关键。本研究以饶阳凹陷留楚油田 cnx 油藏为例,使用常规的静态地质参数和动态开发数据,建立一种基于模糊评价的水驱油藏剩余油表征与预测方法,实现剩余油分布规律的高精度及快速预测。首先,筛选影响储层流体渗流的 10 个一级评价参数,分析其与剩余油赋存的相关性,并计算每个参数的影响权重。然后,根据这些参数的属性将其归为地质和开发两个二级评价因素,并重新计算其权重系数,得到每个井点的剩余油分布概率。最后,基于径向基函数插值方法,叠加构造、岩性的约束参数,预测剩余油的平面分布模式。多口生产井的实际动态数据验证结果表明:基于模糊评价的水驱油藏开发后期剩余油表征方法是可行的,其数据处理简单、操作便捷、结论可靠;与单因素模糊评价法相比,其预测精度提升了 13.1%,与研究区实际开发结论吻合度达 85.4%,指导了油藏挖潜方案的制定。

关键词:剩余油表征;模糊综合评价;径向基函数插值;层次分析法;留楚油田

中图分类号:TE327

文献标志码:A

Characterization and prediction of remaining oil in water-flooded reservoirs using a fuzzy evaluation method

JIA Yinghui¹, ZHAO Yuzhi³, RAN Aihua⁴, WANG Jinkai^{1,2}, LI Yuhan¹, XIE Jun¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Exploration and Development Research Institute of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu 062552, China;

3. No. 3 Oil Production Plant of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Cangzhou 062550, China;

4. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine

Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: For reservoirs in the late stage of water-flooded development, predicting the distribution of remaining oil and formulating effective strategies for tapping remaining oil potential are crucial for enhancing ultimate recovery. Taking the cnx reservoir in Liuchu Oilfield of Raoyang Sag as an example, this study established a method for the prediction and characterization of remaining oil in water-flooded reservoirs based on fuzzy evaluation utilizing conventional static geological parameters and dynamic production data to achieve the efficient and high-precision prediction of remaining oil distribution. First, ten key evaluation parameters influencing fluid flow in the reservoir were selected. Their correlations with remaining oil saturation were analyzed and the weighting factor of each parameter was calculated. Then, these parameters were categorized into the secondary

收稿日期:2025-04-30

基金项目:新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1407105)

作者简介:贾颖慧(2000—),女,山东济宁人,硕士研究生,主要从事油气开发和地质建模。E-mail:jiayinghui2000@163.com

王金凯(1982—),男,山东潍坊人,副教授,博士,主要研究方向是油气田开发地质、地下储气库运行数值模拟,本文通信作者。E-mail:wangjk@sdust.edu.cn

evaluation factors of geology and development based on their attributes, and their weight coefficients were recalculated to derive the probability of remaining oil distribution at each well location. Finally, by applying the radial basis function interpolation method and incorporating structural and lithological constraints, the planar distribution pattern of remaining oil was predicted. Validation with actual dynamic data from multiple production wells demonstrates that with straightforward data processing, operational simplicity, and reliable results, the proposed method for characterizing remaining oil in late-stage water-flooded reservoirs based on fuzzy evaluation is feasible. Compared with the single-factor fuzzy evaluation method, the prediction accuracy is improved by 13.1%, and the consistency with actual development outcomes in the study area reaches 85.4%. This method provides practical guidance for designing reservoir potential tapping strategies.

Key words: remaining oil characterization; fuzzy comprehensive evaluation; radial basis function interpolation; Analytic Hierarchy Process; Liuchu Oilfield

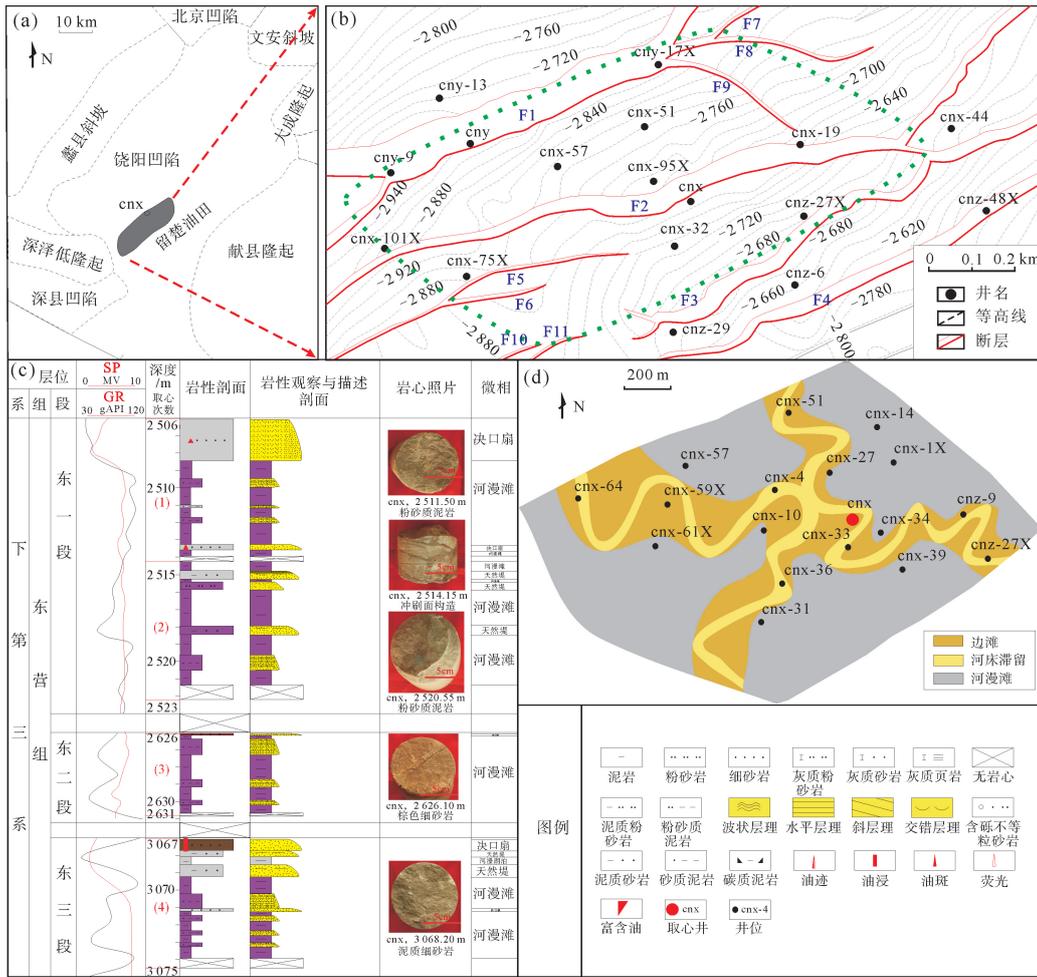
随着油田勘探开发程度不断加深,我国大部分油田已进入中高含水开发阶段^[1],储层中流体分布变得异常复杂,如何对“高度分散、局部富集”的剩余油进行准确描述,实现定量表征,是提高该类型油藏采收率面临的关键问题^[2-3]。目前,剩余油的表征方式主要有三种:一是从微观角度研究剩余油的驱替机理,通过构建微观物理模型揭示剩余油在岩石孔隙中的分布规律^[4];二是利用油藏工程方法,借助大量经验公式计算剩余油的平面分布规律^[5];三是开展油藏数值模拟,利用计算机软件对油藏流体的渗流过程进行模拟,从而表征剩余油在三维空间的分布规律^[6]。其中,数值模拟方法精度相对较高,是常用的剩余油表征手段,但其数据准备过程复杂、计算耗时长,不利于油田现场及时快速地获取地下流体状态,在普及应用中存在很大局限性^[7]。模糊综合评价法能有效整合动静态数据,简化数据标准化过程,在保证精度的同时显著提升计算的效率。

模糊评价方法是 Zadeh^[8]首次提出的一种基于模糊数学理论的评价方法,其通过隶属度函数将定性指标量化,实现对多因素影响下复杂系统的综合评估。目前,在剩余油表征领域,模糊评价方法应用较广泛。如在微观尺度下,Hou等^[9]通过建立因素集、评语集等评价体系,实现了岩心驱替效率的准确预测,精度可达75%;在宏观尺度,Wang等^[10]针对裂缝-孔洞型碳酸盐岩油藏开发难题,创新性地将模糊理论与灰色关联分析相结合,量化了周期注水吞吐的适应性,实现单井产量的准确预测。另外,随着计算机技术的不断进步,模糊评价方法与多种技术融合,如自适应粒子群优化-模糊C均值算法^[11]、基于模糊规则的认知计算方法^[12]、VGG19+SENet方法^[13]、云端大数据智能决策方法^[14]等。上述方法在提高剩余油表征效率和精度方面均有较大进步,但多基于油水井的动态数据分析,往往忽略静态地质参数(如岩性、沉积微相等)的影响,具有一定局限性。

本研究以饶阳凹陷留楚油田为例,提出一种基于多层次模糊综合评价与径向基函数插值的剩余油预测方法,综合考虑地质与开发因素,实现剩余油分布的高效、高精度表征,解决了目前剩余油表征中的影响因素考虑不全面、计算方法复杂、效率低等问题,为高含水油田剩余油挖潜提供了新的技术途径。

1 区域地质概况

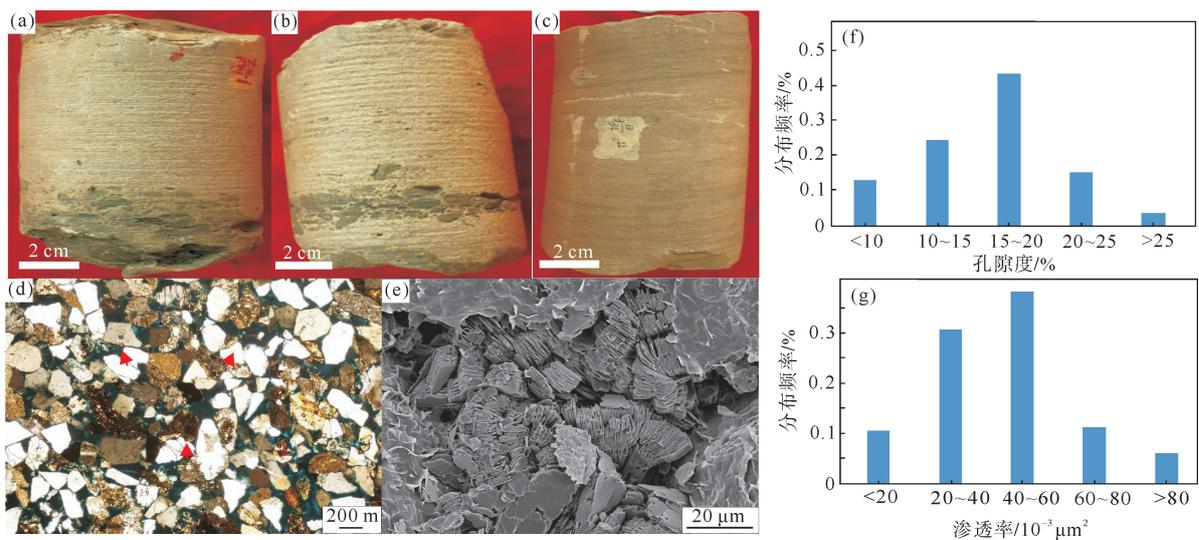
留楚油田位于冀中拗陷饶阳凹陷的中南部,构造上属于留楚构造带善旺断鼻^[15],受北东向断裂系统控制(图1(a))。油层埋深2400~3167m,主要分布于东营组东二段、东三段^[16-17],发育高弯度的曲流河沉积(图1(b)~1(d)),沉积微相类型主要有边滩、天然堤、决口扇、河漫滩等^[18-19]。研究区储层孔隙类型主要有粒内溶孔、次生孔隙、残余原生粒间孔^[20]等(图2(a)~2(e)),属中孔-中渗储层。其中,东二段孔隙度10%~25%,渗透率 $10 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图2(f)~2(g)),且孔隙度与渗透率呈正相关关系,东三段孔隙度10%~25%,渗透率 $1 \times 10^{-3} \sim 100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[21]。



(a)饶阳凹陷区域位置;(b)研究区区域位置;(c)cnx 单井相图;(d)研究区东营组东三段 VI 油层组 1 小层 2 砂层沉积微相展布

图 1 研究区区域位置及构造图

Fig. 1 Regional location and structure map of the study area



(a)c35,2 857.95 m,砂砾岩;(b)c29,2 509.52 m,砂砾岩;(c)c29,3 070.65 m,粗砂岩;(d)L16,1 686.00 m,粒间孔隙; (e)L60,1 963.01 m,孔隙内部结构;(f)储层孔隙度统计;(g)储层渗透率统计

图 2 研究区储层岩性和物性特征

Fig. 2 Lithological and physical characteristics of the reservoir in the study area

2 研究方法 with 数据

2.1 模糊综合评价原理

模糊综合评价 (fuzzy comprehensive evaluation, FCE) 能够有效实现影响因素的模糊化处理与统计分析, 通过计算各评价因素剩余油隶属度值构建模糊评价矩阵, 获取模糊合成评价值, 实现对剩余油分布的定量预测。

2.2 多层次模糊综合评价模型

在单因素评价中, 鉴于因素集 U 存在不同属性, 可依此将其分为 n 个子集合, 即 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 。首先, 针对每个子系统 U_i 的二级评价指标 $u_{ij} (j=1, 2, \dots, m)$, 分别开展单因素一级模糊综合评价; 然后, 借助子系统 U_i 的二级评价指标 u_{ij} 的权重向量 W_i 和评价矩阵 R_i , 通过模糊合成运算, 计算二级指标对应的综合评价结果 B_i ; 最后, 将各子系统的评价结果 $[B_1, B_2, \dots, B_n]$ 组合成二级模糊综合评价矩阵 R , 并利用二级模糊综合评价权重向量 D 再次对矩阵 R 进行模糊合成运算, 得到二级综合评价结果 B 。

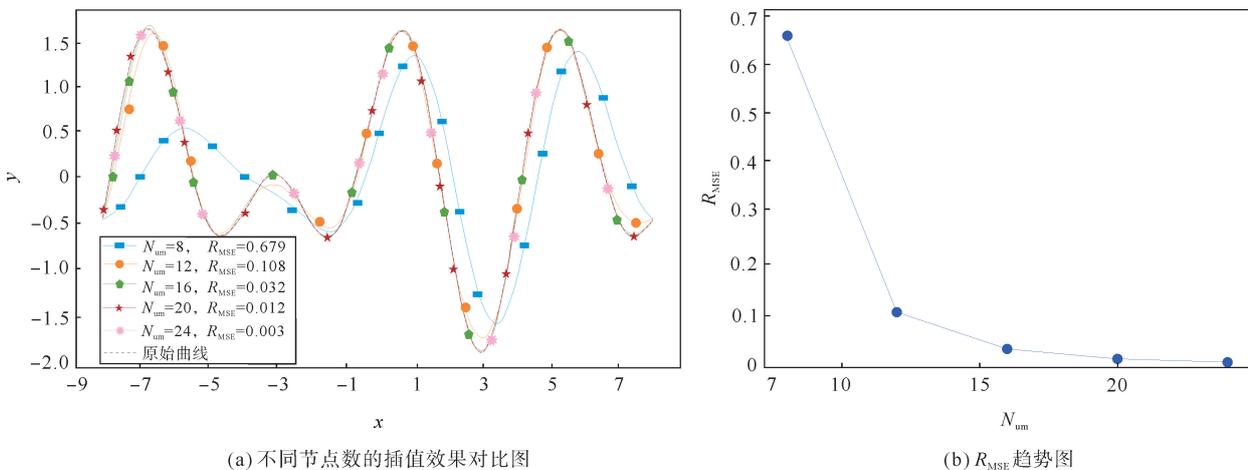
2.3 径向基函数算法

利用上述模糊综合评价方法可以得到油藏内单个井点的剩余油概率, 为表征油藏内的剩余油分布规律, 需进行空间插值。研究表明: 径向基函数 (radial basis function, RBF) 插值方法能有效处理非均匀分布的井点数据, 通过局部支撑函数避免远距离干扰, 适用于非均质油藏剩余油分布预测。径向基函数是某种沿径向对称的标量函数, 通常定义为样本到数据中心之间的欧式径向距离的单调函数, 其通过 RBF 对离散的井点剩余油数据进行插值, 估算整个区域的剩余油概率分布, 并构建离散节点网格模型, 以提高预测精度, 实现均匀网格剩余油分布的可视化。径向基函数插值的基本形式为:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i \varphi(\|x - x_i\|) \tag{1}$$

式中: $F(x)$ 是插值函数; N 是网格面上离散数据点的总个数; $\varphi(\|x - x_i\|)$ 是径向基函数的通用形式, $\|x - x_i\|$ 是两个位置矢量的欧氏距离, 即网格上任意一个离散数据到第 i 个离散数据的距离, x_i 是第 i 个径向基函数的支撑点位置; ω_i 是第 i 个径向基函数对应的系数。

图 3 展示了在相同区间内, 采用不同数量控制节点 (8、12、16、20、24 个) 的径向基函数 (RBF) 插值效果对比以及节点数量对插值精度的影响, 其中 N_{num} 表示节点数量。分析可得: 当插值节点数量较少时, 难以准确捕捉函数的整体特征; 随着节点数的增加, 插值结果逐渐逼近原始曲线, 均方根误差 R_{MSE} 由 0.679 降低至 0.003, 精度显著提高。因此, 通过合理选择控制点数量和径向基函数类型, RBF 插值能够有效解决不规则区域中的数据插值问题, 为剩余油分布预测提供可靠依据。



(a) 不同节点数的插值效果对比图

(b) R_{MSE} 趋势图

图 3 径向基函数模拟插值过程

Fig. 3 Simulation of radial basis function interpolation process

3 数据处理与模型构建

3.1 数据预处理与参数筛选

本研究选取留楚油田 cnx 区块为研究对象,确定了 12 项影响剩余油分布的潜在因素,并采用 Pearson 相关系数分析法量化各参数与剩余油饱和度的相关性,计算相关系数 $|r|$,筛选出 $|r| > 0.3$ 的 10 个关键参数(表 1)。其中,地质参数中有效厚度和渗透率的相关系数 r 分别为 0.42、0.38,相关性最强;开发参数中受效方向和井网密度的相关系数 r 分别为 -0.41 、 -0.36 ,呈显著负相关性。

表 1 剩余油分布影响因素及影响机理

Table 1 Influencing factors and influence mechanisms of the distribution of remaining oil

因素分类	影响因素	描述参数	影响机理	相关系数	筛选结果
地质因素	构造发育	构造位置	断层、砂体边缘等不同区域的渗流差异带共同影响了剩余油的分布	0.31	保留
	沉积相	沉积微相类型	不同微相类型导致储集层物性与渗流路径存在明显差异,这种非均质性从根本上控制了剩余油的分布特征与富集区域	0.33	保留
	物性	砂体厚度	砂体厚度较大时,垂向驱替不均,易形成剩余油富集层;厚度较小时,井间或层间干扰强,剩余油分布复杂	0.23	剔除
		有效厚度	砂体厚度直接决定了注入水波及效率的差异,进而控制剩余油的动用效率与分布模式	0.42	保留
		孔隙度	高孔隙度储层渗流条件好,剩余油易被有效驱替;低孔隙度储层渗流阻力大,则易形成剩余油富集区	0.26	剔除
		渗透率	渗透率的高低与储层的非均质性,共同控制了注入水的推进规律与剩余油的分布复杂度	0.38	保留
开发因素	井网控制程度	井网密度	密度大,注水的波及效率高,剩余油量少	-0.36	保留
		注采井距	注采井距小,驱替效率高,剩余油多以条带状分布	-0.32	保留
	动态产能	累积注水倍数	注水量及存水量大,剩余油分布规律性差	-0.30	保留
		累积产液倍数	体现采出程度,采液不均及过高倍数的干扰剩余油分布	-0.34	保留
		累积产油倍数	反映开采程度,其差异和变化影响剩余油分布	0.31	保留
	连通关系	受效方向	影响驱油效率,改变剩余油分布	-0.41	保留

3.2 模糊评价模型的构建

3.2.1 因素集和评价的定义

1) 因素集的定义

影响水驱后微观剩余油分布的主要因素是地质因素 U_1 和开发因素 U_2 ,建立评价因子集为:

$$U = \{U_1, U_2\} = \{\text{地质因素, 开发因素}\}。 \quad (2)$$

式中:地质因素集 $U_1 = \{u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}\}$,分别代表沉积微相类型、构造位置、有效厚度、渗透率;开发因素集 $U_2 = \{u_{21}, u_{22}, u_{23}, u_{24}, u_{25}, u_{26}\}$,分别代表注采井距、井网密度、累积注水倍数、累积产液倍数、累积产油倍数、受效方向。

2) 评价集的定义

评价集 V 是对剩余油分布状态的不同评价等级的集合,根据文献[22-23]调研,选择常用的“五级”评语集,

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}。 \quad (3)$$

式中,调驱效果好为 v_1 、较好为 v_2 、中等为 v_3 、较差为 v_4 、差为 v_5 。

3.2.2 隶属度的求取和权重值的确定

1) 隶属度的求取

隶属度是每个因素在评语集上的单因素评价价值,依据各参数与含水率区间的关系采用统计法求取。根据研究区油藏开发现状,划分为 5 个含水率区间:极低含水[0,5%]、低含水(5%,40%)、中含水(40%,

70%]、高含水(70%,90%)、特高含水(90%,100%)。将极低含水和低含水合并在一起,将特高含水级别又划分为两个级别的含水率区间,以区分水淹程度差异。以此为基础,统计各因素在各个含水率区间的分布,得到各因素的隶属度值(表 2),分别建立地质和开发因素的单因素评价矩阵。

表 2 不同微相类型的隶属度值

Table 2 Membership degree values for different microfacies types

微相类型	含水率区间				
	[0,40%]	(40%,70%]	(70%,90%]	(90%,95%]	(95%,100%]
边滩	0.10	0.07	0.12	0.23	0.48
河道	0.10	0.06	0.11	0.19	0.54
决口扇	0.14	0.15	0.14	0.27	0.3
河漫滩	0.51	0.23	0.13	0.07	0.06

2) 权重值的确定

按照因素之间的相互影响和隶属关系将影响剩余油分布的各因素划分为不同层次的要素组合,包括目标层(剩余油富集程度)、准则层(地质因素、开发因素)和指标层(具体参数),形成递阶层次结构。采用 1~9 标度法(Saaty 标度),将每一层次各因素进行两两比较判断(表 3),结合文献[22-23]确定各因素相对重要性。

以表 3 中的各参数标度值及其对剩余油的影响程度为依据,利用层次分析法,建立判断矩阵,从而对各参数进行相对重要性比较。以地质因素集为例,构造位置对剩余油分布的影响通常比沉积微相更显著,其标度规定为 7,即构造位置的控制作用远大于沉积微相类型。反之,沉积微相类型对构造位置的相对重要性为 1/7,据此构建判断矩阵 A_1 (表 4)。

表 3 标度含义

Table 3 Scale meaning

标度	定义	说明
1	因素 i 与 j 同等重要	两者对剩余油影响相同
3	因素 i 比 j 稍重要	经验或数据支持 i 略占优势
5	因素 i 比 j 明显重要	实际开发中 i 影响明显更强
7	因素 i 比 j 强烈重要	理论或实验证实 i 绝对主导
9	因素 i 比 j 极端重要	无可争议的优先级差异
2,4,6,8	相邻判断的中间值	需要折中时使用

表 4 地质因素的相对重要性

Table 4 Relative importance of geological factors

相对重要性权重	沉积微相类型	构造位置	有效厚度	渗透率
沉积微相类型	1	1/7	1/3	1/3
构造位置	7	1	3	3
有效厚度	3	1/3	1	3
渗透率	3	1/3	1/3	1

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 7 & 1 & 3 & 3 \\ 3 & \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

计算各行的几何平均值 $M_i = \sqrt[4]{\prod_{j=1}^4 a_{ij}}$,包括沉积微相类型、构造位置、有效厚度和渗透率,4 个地质因素的几何平均值总和为 $0.300 + 2.817 + 1.316 + 0.760 = 5.193$ 。归一化得到权重, $\omega_i = \frac{M_i}{\sum_{k=1}^4 M_k}$,归一化后的地质因素的权重向量为 $\omega_d = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4]^T = [0.06 \ 0.54 \ 0.25 \ 0.15]^T$ 。计算判断矩阵 A_1 的最大特征值 λ_{max} 。

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\omega}_d = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 7 & 1 & 3 & 3 \\ 3 & \frac{1}{3} & 1 & 3 \\ 3 & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0.06 \\ 0.54 \\ 0.25 \\ 0.15 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.27 \\ 2.16 \\ 1.06 \\ 0.59 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(\mathbf{A}\boldsymbol{\omega}_d)_i}{\omega_i} = \frac{1}{4} \left(\frac{0.27}{0.06} + \frac{2.16}{0.54} + \frac{1.06}{0.25} + \frac{0.59}{0.15} \right) \approx 4.168. \quad (6)$$

式中, $(\mathbf{A}\boldsymbol{\omega}_d)_i$ 是矩阵 \mathbf{A} 乘以权重向量 $\boldsymbol{\omega}_d$ 的第 i 个分量。

一致性指标 C_1 是衡量判断矩阵偏离一致性的程度指标, 其值越接近于 0, 表明矩阵的一致性越好。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{4.168 - 4}{4 - 1} \approx 0.056. \quad (7)$$

计算一致性比率 C_R , 检验矩阵一致性, 查表^[24]得 4 阶矩阵的随机一致性指标 $R_1 = 0.89$ 。

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} = \frac{0.056}{0.89} \approx 0.063. \quad (8)$$

经计算, 该判断矩阵的一致性比率 $C_R < 0.1$, 通过一致性检验, 表明权重分配合理。

最终, 地质因素集 U_1 的权重集确定为 $\mathbf{W}_1 = [0.06 \ 0.54 \ 0.25 \ 0.15]$, 开发因素集 U_2 的权重向量确定为 $\mathbf{W}_2 = [0.08 \ 0.23 \ 0.12 \ 0.12 \ 0.12 \ 0.21]$ 。

3.2.3 评价矩阵的构建及结果求取

1) 评价矩阵的构建

对单个地质因素 $u_{1i} \in U_1 (i=1, 2, 3, 4)$ 进行评价, 确定对于各个评语等级的隶属程度, 结果是一个模糊子集。

$$r_i = \{r_{i1} \ r_{i2} \ r_{i3} \ r_{i4} \ r_{i5}\}. \quad (9)$$

式中, r_{ij} 表示因素 u_{1i} 对评语 v_j 的隶属度, 满足 $0 \leq r_{ij} \leq 1$, 且归一化使得 $\sum_{j=1}^5 r_{ij} = 1$ 。地质因素的所有单因素评价集 r_1, r_2, r_3, r_4 放在一起, 构成一个评价矩阵 \mathbf{R}_1 。

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1 \\ \mathbf{r}_2 \\ \mathbf{r}_3 \\ \mathbf{r}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

2) 评价结果的求取

在模糊合成运算中, 利用地质因素的权重向量 \mathbf{W}_1 和评价矩阵 \mathbf{R}_1 , 计算地质因素的综合评价结果。

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{W}_1 \circ \mathbf{R}_1 = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3 \ \omega_4] \circ \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} & r_{25} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} & r_{45} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

式中, \mathbf{B}_1 指综合评价结果, $\mathbf{B}_1 = [b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5]$, 模糊合成算子“ \circ ”采用加权平均型综合评价模型。

$$b_j = \sum_{i=1}^4 \omega_i r_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, 5. \quad (12)$$

式中, b_j 为综合考虑所有因素后, 评价对象对评语 v_j 的总体隶属度。

$$c = \sum_{j=1}^5 b_j d_j. \quad (13)$$

式中, d_j 是利用加权平均方法对每个评语 v_j 赋予的分值, 从而把综合评价结果 \mathbf{B}_1 模糊化为标量 c , 能够更直观地反映剩余油的综合分布状况, 为后续的油藏开发决策提供有力依据。

4 结果和讨论

4.1 模糊综合评价实例

以研究区 c29 井 Ed₂III 油组 1 小层 ①砂组数据为例开展综合模糊评价研究,其所处油藏的地质特征参数和开发动态参数统计结果如表 5 所示,为全区所有井的平均值。

4.1.1 一级模糊综合评价

在一级模糊综合评价中,分别构建了地质因素和开发因素的评价数集(表 6),表中各隶属度值基于研究区地质与开发数据的统计分析。

表 5 砂组网格数据

Table 5 Sand formation grid data

因素	参数	特征
地质因素	沉积微相类型	河道
	构造位置	砂体边缘
	有效厚度/m	3.2
	渗透率/ μm^2	30×10^{-3}
开发因素	注采井距/km	0.3
	井网密度/(口/ km^2)	25
	累积注水倍数	1.44
	累积产液倍数	1.17
	累积产油倍数	0.52
	受效方向/个	3

表 6 地质和开发因素评价数集

Table 6 Evaluation index of geological and development factors

因素分类	子因素	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
地质因素	U_{11}	0.10	0.07	0.12	0.23	0.48
	U_{12}	0.02	0.02	0.10	0.15	0.71
	U_{13}	0.07	0.05	0.08	0.15	0.65
	U_{14}	0.08	0.12	0.15	0.23	0.42
开发因素	U_{21}	0.11	0.09	0.13	0.20	0.47
	U_{22}	0.04	0.03	0.07	0.18	0.68
	U_{23}	0.03	0.04	0.07	0.12	0.74
	U_{24}	0.04	0.04	0.08	0.20	0.64
	U_{25}	0.03	0.04	0.11	0.21	0.61
	U_{26}	0.09	0.12	0.13	0.25	0.41

由权重集和评价矩阵,采用加权平均型综合评价模型 $B=A \circ R$,得到地质因素和开发因素的模糊综合评价结果:

$$\begin{aligned}
 B_1 &= W_1 \circ R_1 = [0.06 \quad 0.54 \quad 0.25 \quad 0.15] \circ \begin{bmatrix} 0.10 & 0.07 & 0.12 & 0.23 & 0.48 \\ 0.02 & 0.02 & 0.10 & 0.15 & 0.71 \\ 0.07 & 0.05 & 0.08 & 0.15 & 0.65 \\ 0.08 & 0.12 & 0.15 & 0.23 & 0.42 \end{bmatrix} \\
 &= [0.046 \ 3 \quad 0.045 \ 5 \quad 0.103 \ 7 \quad 0.166 \ 8 \quad 0.637 \ 7]。 \tag{14}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 B_2 &= W_2 \circ R_2 = [0.08 \quad 0.23 \quad 0.12 \quad 0.12 \quad 0.12 \quad 0.21] \circ \begin{bmatrix} 0.11 & 0.09 & 0.13 & 0.20 & 0.47 \\ 0.04 & 0.03 & 0.07 & 0.18 & 0.68 \\ 0.03 & 0.04 & 0.07 & 0.12 & 0.74 \\ 0.04 & 0.04 & 0.08 & 0.20 & 0.64 \\ 0.03 & 0.04 & 0.11 & 0.21 & 0.61 \\ 0.09 & 0.12 & 0.13 & 0.25 & 0.41 \end{bmatrix} \\
 &= [0.048 \ 9 \quad 0.053 \ 7 \quad 0.0850 \quad 0.137 \ 5 \quad 0.518 \ 9]。 \tag{15}
 \end{aligned}$$

式中: R_1 为地质因素评价矩阵, R_2 为开发因素评价矩阵, B_1 为地质因素综合评价结果, B_2 为开发因素的综合评价结果。根据最大隶属度原则的评价结果分析,该砂组网格数据属于剩余油富集概率评语为“小”。

4.1.2 二级模糊综合评价

由一级评价结果,以{地质因素,开发因素}为二级因素集,构建二级评价矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.046\ 3 & 0.045\ 5 & 0.103\ 7 & 0.166\ 8 & 0.637\ 7 \\ 0.048\ 9 & 0.053\ 7 & 0.085\ 0 & 0.137\ 5 & 0.518\ 9 \end{bmatrix} \quad (16)$$

对应于二级因素集 $U = \{U_1, U_2\} = \{\text{地质因素}, \text{开发因素}\}$, 权重向量 $\mathbf{D} = [D_1 \ D_2] = [0.5 \ 0.5]$, 得到二级模糊评价结果:

$$\begin{aligned} \mathbf{B} = \mathbf{D} \circ \mathbf{R} &= [0.5 \ 0.5] \circ \begin{bmatrix} 0.046\ 3 & 0.045\ 5 & 0.103\ 7 & 0.166\ 8 & 0.637\ 7 \\ 0.048\ 9 & 0.053\ 7 & 0.085\ 0 & 0.137\ 5 & 0.518\ 9 \end{bmatrix} \\ &= [0.047\ 6 \ 0.049\ 6 \ 0.094\ 35 \ 0.152\ 15 \ 0.578\ 3] \end{aligned} \quad (17)$$

定义含水率小于 90% 的区域为弱水淹,为将模糊评价结果转化为直观的定量指标,对五个评语等级进行赋值,得到权重向量 $\mathbf{D}' = [d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4 \ d_5] = [1.5 \ 1.0 \ 0.5 \ 0 \ 0]$, 分别对应剩余油调驱效果从好到差五个等级的赋值分数。通过加权平均计算该砂组的综合评价价值 c 。

$$c = \sum_{j=1}^5 b_j d_j = 0.047\ 6 \times 1.5 + 0.049\ 6 \times 1.0 + 0.094\ 35 \times 0.5 + 0.152\ 15 \times 0 + 0.578\ 3 \times 0 = 0.120\ 575 \quad (18)$$

研究区 c29 井 Ed₂ II 1 油组 1 小层①砂组的模糊综合评价结果为 0.120 575, 表明存在剩余油的概率为 12.057 5%。

4.1.3 基于径向基函数(RBF)的函数插值

首先通过多层次模糊综合评价模型,得到各井点的剩余油富集概率,然后使用径向基函数对这些散点值进行空间插值,插值结果可以预测油藏尺度上剩余油的分布规律。径向基函数插值的基本原理是构建一个由所有已知数据点加权组合的连续函数,其通式为:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i \varphi(\|x - x_i\|) \quad (19)$$

式中: $F(x)$ 为待求的插值函数,表示位置 x 处的剩余油概率预测值; N 为已知井点的总数量; x_i 为第 i 个井点的坐标位置; $\|x - x_i\|$ 为预测点 r 到井点 r_i 的欧氏距离; $\varphi(x)$ 为选定的径向基函数; ω_i 为对应于第 i 个井点的待求权重系数。

为确定最优的径向基函数类型,本研究选取研究区 Ed₂ II-3-1 层的 32 口井数据作为训练集,在相同的节点分布 ($N=286$) 和优化参数下,对比三种常见 RBF 函数的插值性能(表 7)。支撑半径 d 的候选范围根据井点平均间距设定为 $1.0 \leq d \leq 1.4$ km, 并通过留一交叉验证(leave-one-out cross-validation, LOOCV)进行优选,最终确定 $d=1.2$ km, 形状参数 $\epsilon=0.8d$ 。

表 7 不同基函数的对比实验结果

Table 7 Comparative experimental results of different basis functions

基函数类型	数学表达式	R_{MSE} (剩余油概率)	最大绝对误差	计算耗时/s	地质适应性
Wendland's C2	$\varphi(\eta) = \begin{cases} (1-\eta)^4(4\eta+1), & 0 \leq \eta < 1 \\ 0, & \eta \geq 1 \end{cases}$	0.085	0.15	12.3	紧支撑避免远距离干扰, 适合非均质储层
高斯函数	$\varphi(r) = \exp\left(-\left(\frac{r}{\epsilon}\right)^2\right)$	0.102	0.21	18.7	过度平滑, 易受噪声影响
多重二次函数	$\varphi(r) = \sqrt{1 + \left(\frac{r}{\epsilon}\right)^2}$	0.094	0.18	15.2	全局支撑导致边缘振荡, 拟合不稳定

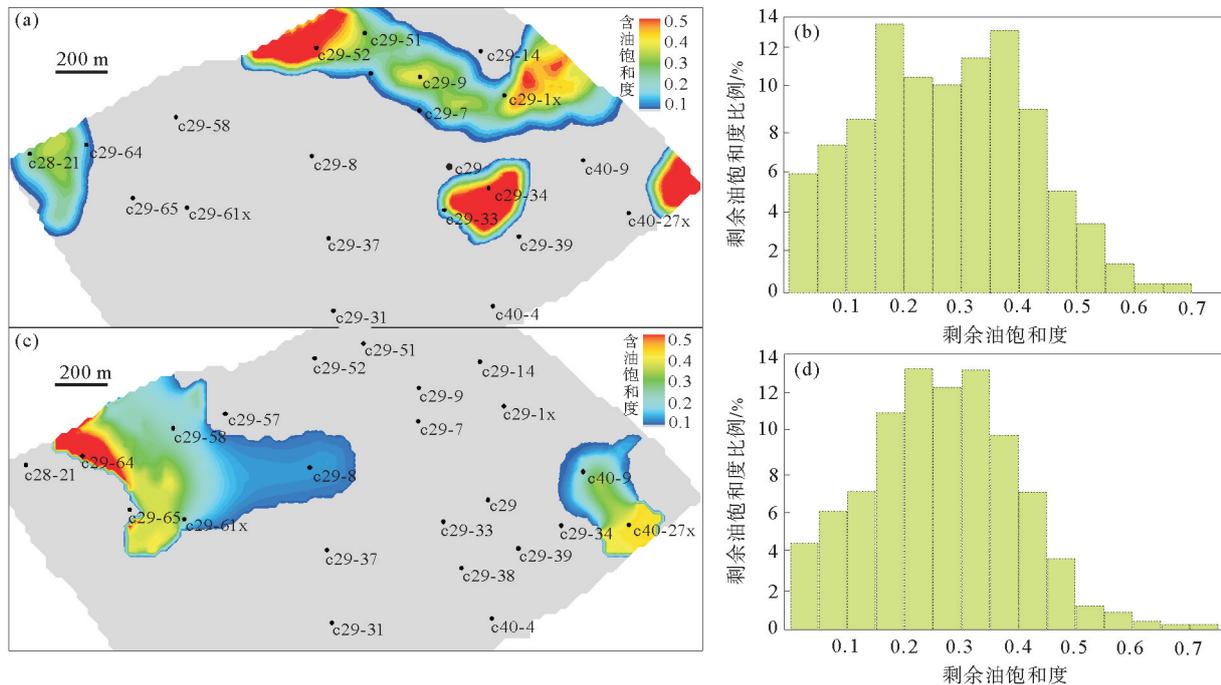
对比结果表明, Wendland's C2 函数的均方根误差(RMSE)、最大绝对误差和计算效率均为最佳, 更适合剩余油分布的非均质插值, 能有效避免远距离数据干扰。

权重系数 ω_i 通过求解以下线性方程组获得:

$$Q = M\omega \tag{20}$$

式中, M 为 $N \times N$ 的对称矩阵, 其元素 $M_{ij} = \varphi(\|x_i - x_j\|)$; $\omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \dots \ \omega_N]^T$ 为待求的权重系数向量, $Q = [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_N]^T$ 为已知井点剩余油概率向量。求解该方程组得到 ω 后, 即可代入通式计算研究区任意位置的剩余油概率, 进而生成全区的剩余油概率分布平面图。

基于上述方法, 对研究区 Ed₂ II-3-1 和 Ed₂ II-4-2 两个主力小层进行插值计算与数值占比统计(图 4)。分析可知, Ed₂ II-3-1 小层剩余油高概率区主要分布于 cnx-34 井区, 该分布模式主要受控于沉积相和注采井距, 即河道和边滩砂体物性较好, 剩余油容易聚集, 注采井距大, 井间干扰弱, 剩余油饱和度高; 剩余油概率低的井区分别位于 cnx-8 和 cnx-7 井区, 主要受控于储层质量和注采井距, 即河道边界的砂体厚度较薄, 物性较差, 剩余油不容易聚集, 注采井距小, 水驱波及效率高, 剩余油饱和度低。Ed₂ II-4-2 小层的高概率区则集中在 cnx-64 井区, 其分布同样受优质沉积微相与较大注采井距的共同控制。



(a)Ed₂ II-3-1 层含油饱和度; (b)Ed₂ II-3-1 层含油饱和度比例; (c)Ed₂ II-4-2 层含油饱和度; (d)Ed₂ II-4-2 层含油饱和度比例

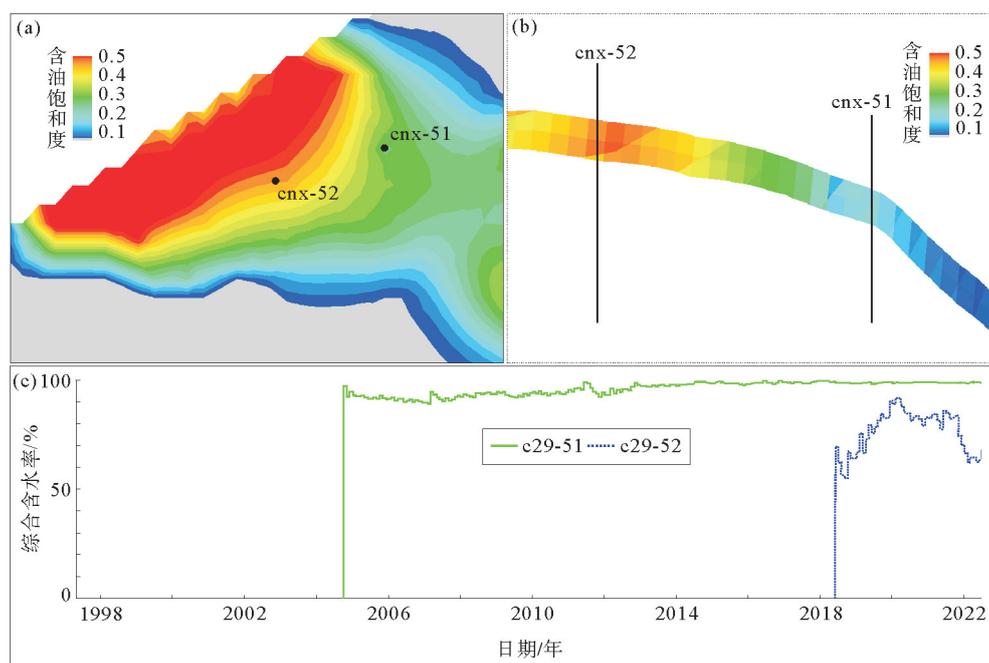
图 4 含油饱和度分布及数值占比统计图

Fig. 4 Oil saturation distribution and proportion statistics in Ed₂ II-3-1 and Ed₂ II-4-2 sub-layers

4.2 剩余油预测结果验证

利用上述方法, 计算研究区每个小层的剩余油概率分布图。为了验证计算结果的可靠性, 选取研究区的生产井进行动态对比。若井的综合含水率低, 则证明该井区的剩余油饱和度高; 反之, 则剩余油饱和度低。通过对比 cnx-51 井和 cnx-52 井的综合含水率(图 5), 可以得出: 2022 年 7 月末, 两口井的含水率差别较大, cnx-52 的综合含水率为 64%, 而 cnx-51 井高达 98%。对比剩余油饱和度图可以看出, cnx-52 井附近已完全水淹, 剩余油饱和度低; 而 cnx-51 井附近的剩余油饱和度相对较高, 水淹程度低(图 5)。说明计算得出的剩余油分布概率与实际生产饱和度值是相对应的。

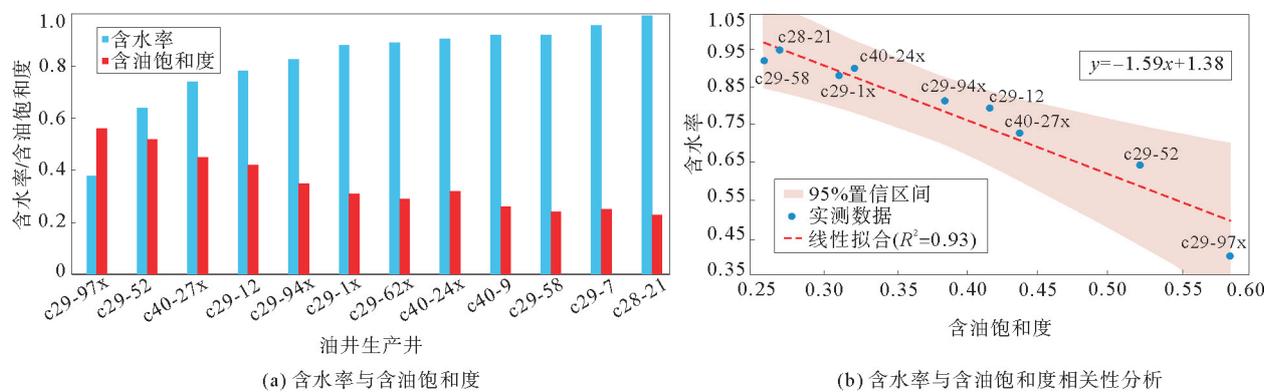
研究区目前有开发井 22 口, 其中油井 12 口, 水井、开井 10 口, 统计分析 12 口油井的综合含水率和计算的含油饱和度可以看出, 含水率高的井, 其计算的含油饱和度相对偏低, 而且两者呈负相关关系(图 6)。含油饱和度较低的井, 如 cnx-97x、cnx-52 井, 其综合含水率相对较低, 井的产能好; 而含油饱和度高的井, 如 cny-21、cnx-7 井, 其综合含水率高, 产能较差, 计算结果与实际井的产能状况相对应。与单因素模糊评价法相比^[25], 该方法的预测准确率提升了 13.1%(达 85.4%), 计算效率较数值模拟方法提高 12 倍, 在高效剩余油预测方面具明显优势。



(a) 剩余油饱和度平面图; (b) 剩余油饱和度剖面图; (c) 含水率曲线

图 5 研究区小层剩余油概率分布及生产井含水率对比验证图

Fig. 5 Comparison and validation of remaining oil probability distribution and production well water cut in the sub-layers of the study area



(a) 含水率与含油饱和度

(b) 含水率与含油饱和度相关性分析

图 6 综合含水率与计算含油饱和度之间的关系及相关性

Fig. 6 Relationship and correlation between comprehensive water cut and calculated oil saturation

5 结论与展望

1) 构建基于多层次模糊综合评价与 RBF 插值的剩余油预测方法, 筛选出影响储层剩余油分布的 10 个关键影响因素, 并将其划分为地质和开发两个因素群组, 求取个体及群组评价指标的权重, 其中构造位置和有效厚度权重占比最高, 为研究区剩余油控制因素。

2) 实现动静态数据融合的剩余油定量表征, 其结果与实际开发动态吻合度达 85.4%, 具备良好的工程适用性。

模糊评判过程中的权重分配仍部分依赖专家经验, 存在一定不确定性, 未来可引入熵权法或组合赋权策略, 探索不同层次剩余油影响因素的权重判别方法, 以降低主观因素的影响。另外, 对于分析结果的验证精度有待提高, 应借助更加精确的实时生产测井数据和产能剖面测试数据开展多时间点验证, 避免仅适

用动态数据和数值模拟结果验证的局限性。

参考文献:

- [1] 罗波波,燕高飞,谢敏,等.东濮老区高含水油藏高通量水洗微观剩余油赋存机理[J].断块油气田,2025,32(1):147-152.
LUO Bobo,YAN Gaofei,XIE Min,et al. Microscopic remaining oil occurrence mechanism of high-flux water washing in high water cut reservoirs of Dongpu mature region[J]. Fault-Block Oil and Gas Fields,2025,32(1):147-152.
- [2] 刘萍,张皎生,王睿恒,等.低渗透储层基于岩心仿真模型的微观剩余油研究[J].石油化工应用,2025,44(2):28-31.
LIU Ping,ZHANG Jiaosheng,WANG Ruiheng,et al. Study of microscopic remaining oil in low permeability reservoir based on core simulation model [J]. Petrochemical Industry Application,2025,44(2):28-31.
- [3] 张顺康,刘炳官,尤启东,等.复杂断块油藏剩余油再富集实验及评价研究[J].复杂油气藏,2024,17(3):309-316.
ZHANG Shunkang,LIU Bingguan,YOU Qidong,et al. Experiments and evaluation on remaining oil re-enrichment in complex fault block reservoirs[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs,2024,17(3):309-316.
- [4] 王敬,徐智远,刘俊源,等.断控缝洞型油藏底水驱剩余油分布规律及挖潜策略[J].石油勘探与开发,2024,51(5):1101-1113.
WANG Jing,XU Zhiyuan,LIU Junyuan,et al. Distribution rules of remaining oil by bottom water flooding and potential exploitation strategy in fault-controlled fractured-vuggy reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development,2024,51(5):1101-1113.
- [5] 林艳波,李军建,程林松,等.物理模拟融合油藏精细刻画法表征特低渗油藏中高含水期剩余油分布[J].石油钻采工艺,2024,46(2):175-188.
LIN Yanbo,LI Junjian,CHENG Linsong,et al. Characterization of remaining oil distribution in ultra-low permeability reservoirs during middle-high water cut by physical simulation combined with reservoir fine sculpture method[J]. Oil Drilling and Production Technology,2024,46(2):175-188.
- [6] 张晓明,吴勤博,邹焰,等.鄂尔多斯盆地铁边城地区长2油层组剩余油模拟[J].科学技术与工程,2024,24(5):1799-1807.
ZHANG Xiaoming,WU Qinbo,ZOU Yan,et al. Simulation of remaining oil in Chang 2 member in Tiebiancheng area, Ordos Basin [J]. Science Technology and Engineering,2024,24(5):1799-1807.
- [7] 郑超.油藏数值模拟方法研究及算法设计[J].化工设计通讯,2025,51(5):91-93.
ZHENG Chao. Research on reservoir numerical simulation methods and algorithm design[J]. Chemical Engineering Design Communications,2025,51(5):91-93.
- [8] ZADEH L A. A note on prototype theory and fuzzy sets[J]. Cognition,1982,12(3):291-297.
- [9] HOU J,ZHANG S K,ZHANG Y H,et al. Prediction of microscopic remaining oil distribution using fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transport in Porous Media,2011,89:533-545.
- [10] WANG D G,SUN J J. Oil recovery for fractured-vuggy carbonate reservoirs by cyclic water huff and puff:Performance analysis and prediction[J/OL]. Scientific Reports,2019,9. DOI:10.1038/s41598-019-51807-4.
- [11] WANG D G,LI Y,HU Y L,et al. Integrated dynamic evaluation of depletion-drive performance in naturally fractured-vuggy carbonate reservoirs using DPSO-FCM clustering[J/OL]. Fuel,2016. DOI:10.1016/j.fuel.2016.05.009.
- [12] MAO Q Q,MA X H,WANG Y H. A decision support engine for infill drilling attractiveness evaluation using rule-based cognitive computing under expert uncertainties[J/OL]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2022,208. DOI:10.1016/j.petrol.2021.109671.
- [13] 李望奇,滕奇志,何小海,等.基于深度学习的剩余油形态分类[J].计算机系统应用,2023,32(12):224-232.
LI Wangqi,TENG Qizhi,HE Xiaohai,et al. Morphological classification of remaining oil based on deep learning[J]. Computer Systems and Applications,2023,32(12):224-232.
- [14] 底青云,李守定,付长民,等.基于云端大数据的智能导向钻井技术方法[J].工程地质学报,2021,29(1):162-170.
DI Qingyun,LI Shouding,FU Changmin,et al. Intelligent steering drilling technology method based on cloud big data [J]. Journal of Engineering Geology,2021,29(1):162-170.
- [15] 王伟,孙同文,曹兰柱,等.油气由断裂向砂体侧向分流能力定量评价方法:以渤海湾盆地饶阳凹陷留楚构造为例[J].石油与天然气地质,2016,37(6):979-989.

- WANG Wei,SUN Tongwen,CAO Lanzhu,et al. An quantitative evaluation method of probability for diversion flow oil and gas laterally from faults to sand bodies: A case study from Leave Chu Structure in the Raoyang Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil and Gas Geology*,2016,37(6):979-989.
- [16] 柴永波,达丽亚,杨海风,等. 辽西南洼东营组层序地层格架下的沉积相特征及演化[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*,2015,34(4):37-42.
- CHAI Yongbo,DA Liya,YANG Haifeng,et al. Sedimentary facies and evolution of Dongying sequence stratigraphic framework in Southern Liaoxi Sag[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2015,34(4):37-42.
- [17] 郑华,李云鹏,陈建波,等. 渤海复杂断块油藏油水界面差异成因探讨分析:以辽中凹陷W油田7井区为例[J]. *油气藏评价与开发*,2018,8(5):23-28.
- ZHENG Hua,LI Yunpeng,CHEN Jianbo,et al. Analysis and discussion on cause of OWC differentiation of complex faulted reservoir in Bohai area: A case study of well block 7 in W oilfield of Liaozhong sag[J]. *Reservoir Evaluation and Development*,2018,8(5):23-28.
- [18] 曹英权,曲希玉,王清斌,等. 渤中凹陷CFD6-4油田东营组储层特征及物性控制因素[J]. *地质通报*,2024,43(5):701-711.
- CAO Yingquan,QU Xiyu,WANG Qingbin,et al. Reservoir characteristics and controlling factors of physical properties of the Dongying Formation of the CFD6-4 Oilfield in the Bozhong Sag[J]. *Geological Bulletin of China*,2024,43(5):701-711.
- [19] WANG C,LYU Y F,WANG Q,et al. Evaluations of oil and gas lateral migration across faults: A case study of Shigezhuang nose structure of Wen'an slope in Baxian sag,Jizhong depression,Bohai Bay Basin,East China[J]. *Petroleum Exploration and Development Online*,2017,44(6):932-940.
- [20] 何之明. 饶阳凹陷留楚地区东营组沉积微相与有利砂体预测[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2020.
- HE Zhiming. The sedimentary microfacies and favorable sandbody predictions of Dongying Formation in Liuchu Oilfield,Raoyang Sag[D]. Qingdao:China University of Petroleum(East China),2020.
- [21] 陈晶莹,曾静波,赵建斌,等. 南堡4号构造东营组岩石物理相特征及其分类评价[J]. *地球与行星物理论评*,2024,55(2):248-256.
- CHEN Jingying,ZENG Jingbo,ZHAO Jianbin,et al. Petrophysical facies characteristics and classification evaluation of Dongying Formation of Nanpu No. 4 structure[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*,2024,55(2):248-256.
- [22] 王恒,颜斌,崔鑫,等. 基于熵值多级模糊综合评判的空气质量综合评价[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*,2016,35(5):102-108.
- WANG Heng,YAN Bin,CUI Xin,et al. Multilevel air quality evaluation based on entropy multilevel fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*,2016,35(5):102-108.
- [23] 赵晨云,窦松江,窦煜,等. 高含水期油藏剩余油聚集度表征方法[J]. *新疆石油地质*,2023,44(6):690-695.
- ZHAO Chenyun,DOU Songjiang,DOU Yu,et al. A new method for characterizing remaining oil in high water-cut reservoirs [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*,2023,44(6):690-695.
- [24] SAATY T L. Analytic hierarchy process[M]//*Encyclopedia of operations research and management science*. Boston: Springer,2013:52-64.
- [25] 封从军,鲍志东,陈炳春,等. 扶余油田基于单因素解析多因素耦合的剩余油预测[J]. *石油学报*,2012,33(3):465-471.
- FENG Congjun,BAO Zhidong,CHEN Bingchun,et al. Application of the single factor analysis and multifactor coupling method to the remaining oil prediction in Fuyu oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*,2012,33(3):465-471.

(责任编辑:高丽华)