

基于组合赋权法与云模型的致密砂岩储集层 有利区评价方法研究: 以松辽盆地南部乾深区块青三段 x 小层为例*

王腾宇^{1,2} 鲍志东^{1,2} 李忠诚³ 韩昊天^{1,3} 姜振昌^{1,3}
李 磊⁴ 夏昌盛^{1,2} 欧长健^{1,2} 刘维则^{1,2} 张 淘^{1,2}

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 深层地热富集机理与高效开发全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249

3 中国石油吉林油田分公司勘探开发研究院, 吉林松原 138000

4 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江大庆 163318

摘 要 针对松辽盆地南部乾安油田乾深区块青三段 x 小层致密砂岩储集层有利区评价中权重确定偏主观、评价标准存在模糊性的问题, 探索了一套结合主客观权重的综合评价方法。该方法先通过层次分析法计算专家经验权重, 再利用 CRITIC 法分析数据得出客观权重, 最后将二者结合得到综合权重。同时引入正态云模型, 基于评价等级分值区间并结合边界隶属度阈值约束推导标准云参数(期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e), 建立评价等级与实测数据之间的灵活对应关系, 有效处理评价过程中的不确定性问题。实际应用表明, 沉积相带、含油性和有效厚度是影响有利区的主要因素, 其综合权重分别为 0.253、0.182 和 0.124。对 20 口井的评价结果显示, 一类区 12 口、二类区 5 口、三类区 3 口, 结果与前人认识符合率达到 95%, Kappa 系数 $\kappa=0.91$ 。证明这套方法在致密砂岩储集层有利区评价中具有较好的实用价值。

关键词 有利区评价 AHP-CRITIC 组合赋权法 云模型 松辽盆地

第一作者简介 王腾宇, 男, 1996 年生, 博士研究生, 现主要从事沉积地质学和储层地质学研究。E-mail: wangty185@gmail.com。

通讯作者简介 鲍志东, 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 现主要从事沉积学与岩相古地理、储层地质与油藏描述研究。E-mail: baozhd@cup.edu.cn。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A

A methodology for favorable area evaluation of tight sandstone reservoirs integrating combined weighting and cloud model approaches: a case study of X subunit of the Member 3 of Qingshankou Formation, Qianshen Block, southern Songliao Basin

* 国家科技重大专项(编号: 2024ZD1003604)、国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0603104, 2018YFC0604304)和中国石油天然气股份有限公司吉林油田分公司勘探开发研究院项目(编号: JLYT-YJY-2024-FW-13)联合资助。[Co-funded by the National Science and Technology Major Project for Deep Underground (No. 2024ZD1003604) and the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2017YFC0603104, 2018YFC0604304) and Project of the Exploration and Development Research Institute of Jilin Oilfield, PetroChina (No. JLYT-YJY-2024-FW-13)]

收稿日期: 2025-11-18 改回日期: 2026-01-20

WANG Tengyu^{1,2} BAO Zhidong^{1,2} LI Zhongcheng³ HAN Haotian^{1,3} JIANG Zhenchang^{1,3}
LI Lei⁴ XIA Changsheng^{1,2} OU Changjian^{1,2} LIU Weize^{1,2} ZHANG Tao^{1,2}

1 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Deep Geothermal Resources, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 Exploration and Development Research Institute, Jilin Oilfield Company, PetroChina, Jilin Songyuan 138000, China

4 College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Heilongjiang Daqing 163318, China

Abstract To reduce the subjectivity in indicator weighting and the fuzziness of grading criteria in favorable area evaluation of tight sandstone reservoirs, we develop an integrated method that couples combined weighting with a normal cloud model, and apply it to the X subunit of the Member 3 of the Qingshankou Formation (Q3) in the Qianshen Block, southern Songliao Basin. First, subjective weights are derived from expert judgment using the Analytic Hierarchy Process (AHP). Objective weights are then obtained from the dataset using the CRITIC method. The two sets of weights are finally integrated to produce combined weights, improving both geological rationality and data-driven objectivity. Meanwhile, a normal cloud model is introduced to characterize uncertainty during grade assignment. Standard cloud parameters—expectation (E_x), entropy (E_n), and hyper-entropy (H_e)—are determined from the score intervals of evaluation grades under constraints of a boundary membership threshold, enabling a flexible mapping between evaluation grades and measured data. Results show that sedimentary facies belt, oil-bearing property, and effective thickness are the dominant controls on favorable areas, with combined weights of 0.253, 0.182, and 0.124, respectively. Evaluation of 20 wells identifies 12 wells for Class I, five wells for Class II, and three wells for Class III wells; the outcomes show 95% agreement with previous interpretations, with a Cohen's kappa coefficient (κ) of 0.91. The method therefore provides a practical and reliable tool for favorable area evaluation of tight sandstone reservoirs.

Key words favorable area evaluation, AHP-CRITIC combined weighting method, cloud model, Songliao Basin

About the first author WANG Tengyu, born in 1996, is a Ph.D. candidate. He is currently engaged in sedimentary research. E-mail: wangty185@gmail.com.

About the corresponding author BAO Zhidong, born in 1964, is a professor and supervisor of the Ph.D. candidate. He is mainly engaged in research on sedimentology and lithofacies palaeogeography, reservoir geology and reservoir description. E-mail: baozhd@cup.edu.cn.

0 引言

近年来,国际局势不断变化,导致原油价格剧烈波动,致使中国能源供应面临严峻挑战。作为全球最大的能源消费国之一,中国经济的持续快速发展对石油资源的需求日益增长,石油对外依存度长期居高不下,对国家能源战略安全构成了潜在风险(沈华等,2023,2025;邹才能等,2025)。在此背景下,加快国内老油田的精细勘探与未动用储量有效开发,已成为实现国内增储上产、保障国家能源安全的重要途径。松辽盆地作为中国重要的油气

生产基地,其南部乾安油田白垩系青山口组三段(青三段)是近年来增储挖潜的关键层系之一。该层系以致密—低渗透砂岩为主,存在相带变化快、油水关系复杂、“甜点”分布规律不明确等地质难题(张莉等,2017;王俊等,2018;张君峰等,2020;李磊等,2023;赵晨旭等,2023)。传统的评价方法在面对此类复杂储集层时,往往难以精准刻画“有利区”边界的模糊性与评价指标的不确定性,导致勘探决策风险高、钻探成功率难以进一步提升。因此,建立一套能够适应复杂地质条件、科学融合多源信息的

确定性综合评价模型,对于乾安油田青三段的高效勘探与开发具有紧迫的现实意义。

有利区综合评价的核心问题在于如何科学确定各评价指标的权重,并合理处理评价标准中的模糊性与随机性。致密砂岩有利区预测多采用沉积相、砂岩厚度、烃源岩、含油性等多因素确定性叠加评价方法,即先分别建立各类单因素平面展布图,再通过归一化处理、人工设定权重进行综合叠加,划分有利区与非有利区(付金华等,2022;杨迪等,2025)。此方法在权重与阈值的设定上高度依赖专家经验,属于典型的主观评价。单一赋权方式难以兼顾决策者的知识经验与数据本身的客观规律,基于此,提出使用主观与客观相结合的组合赋权法来对有利区评价的各指标进行赋权,在保证主客观各自特点的同时降低偏差,得到更符合真实情况的评价结果。主观权值方面采用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP),客观权值方面采用 CRITIC 法 (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation),2 种方法结合运用乘法合成法来确定综合指标权重(郭金玉等,2008)。在确定好指标权重后进行隶属度的确定,现有方法主要根据主观取值或利用函数及经验公式计算,但准确度都欠佳。为使计算更加准确,引入一种能够有效处理不确定性问题智能评价模型:云模型。该模型由李德毅院士提出,通过期望 (E_x)、熵 (E_n) 和超熵 (H_e) 3 个数字特征,天然地融合了模糊数学和概率统计的优点,能够实现定性概念与定量值之间的不确定性转换,更加准确地刻画地质概念中的模糊性和随机性(李德毅和刘常显,2004;李海林等,2025)。经过多年发展,云模型已在诸多领域的综合评价中取得成功应用,如人工智能与智能控制、城市生态环境评价、网络安全态势评估等(李德毅,2009;张拥军和唐俊,2014;陈萍等,2023)。相比于其他行业,云模型在地质领域的应用目前较少,只有少数人应用在地层划分及测井解释等研究(张亚光和李玉龙,2016;王书黎等,2025),且较少与主客观组合赋权法深度耦合,在储集层有利区综合评价中还尚未有人使用此方法,期望未来契合能源领域新质生产力发展(李新坡等,2025)。

以松辽盆地南部乾安油田乾深区块青三段 x 小层为研究对象,开展基于组合赋权法与云模型有利区评价方法研究。系统构建了涵盖致密砂岩储集

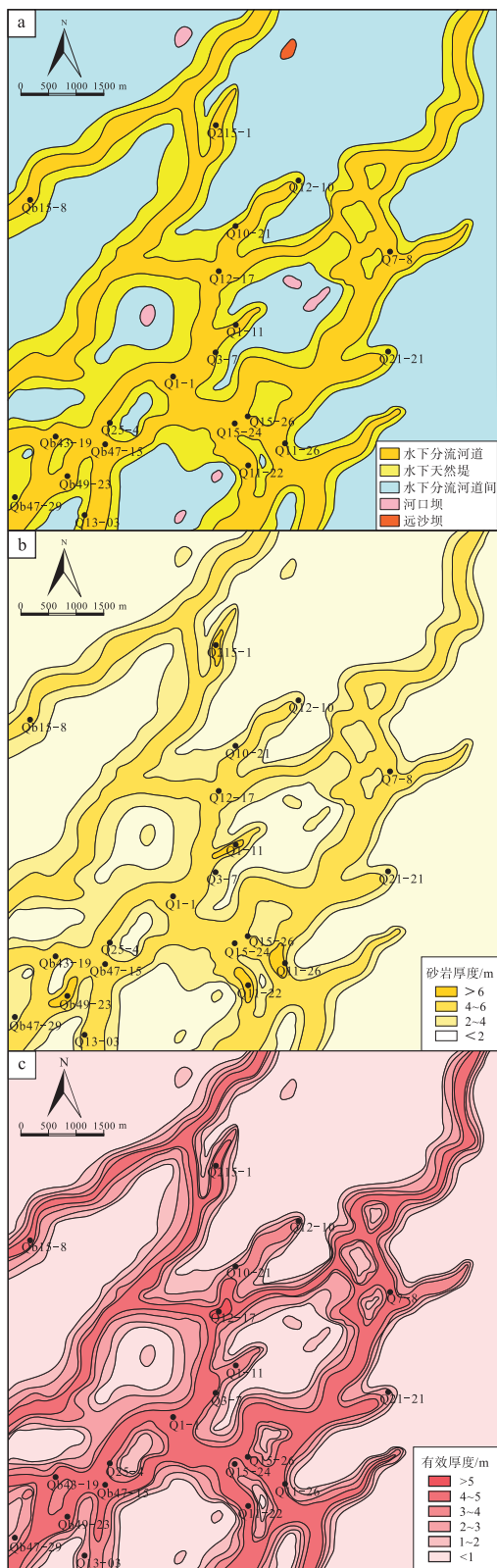
层沉积、油藏、构造等多因素的综合评价指标体系,采用 AHP-CRITIC 相结合的组合赋权法来确定指标权重,旨在融合专家经验知识与数据客观信息,使权重分配更为科学合理,利用云模型构建各评价指标的隶属度函数,实现对研究区有利区的综合分类评价(杨洁等,2018;赵书强和汤善发,2019;何欣宇等,2025)。本研究旨在为松辽盆地的勘探部署提供直接的科学依据,同时也为同类复杂油气藏的“甜点”预测与评价提供一种新的、可靠的技术方法借鉴。

1 有利区评价关键地质因素分析

油气勘探中的有利区系指在现有技术经济条件下最可能获得高产稳产工业油流的区域,其评价是一个多学科、多参数融合的综合性地质研究(朱奕璇等,2025)。松辽盆地南部乾深区块青三段 x 小层有利区的形成主要受沉积、油藏及构造 3 类关键地质因素的协同控制。

1.1 沉积因素

沉积是储集层形成的物质基础,从根本上控制了储集层的空间展布与原始物性(崔映坤等,2025)。其中,沉积相带是首要控制因素,乾深区块 x 小层主要发育浅水三角洲前缘亚相,包含水下分流河道、水下分流河道侧缘、河口坝、远沙坝、水下天然堤及水下分流间湾等微相。其中,发育水下分流河道微相的位置最为有利,河道侧缘及河口坝次之,天然堤及间湾较差(图 1-a)。砂岩厚度决定了资源规模基础,本区 x 小层平均厚度为 4 m,本次研究将大于 6 m 区域划为最有利区,将小于 2 m 区域划为较差地区(图 1-b)。有效厚度作为比砂岩厚度更关键的指标,直接决定了有效储量,本区 x 小层平均厚度为 2.8 m,本次将大于 5 m 区域定义为最有利区,将小于 2 m 区域定义为较差地区(图 1-c)。砂体剖面形态控制油气富集部位,从研究区连井剖面相来看,主要有顶平底凸、不对称楔形、顶凸底平和薄层楔状体等形态,其中,以顶平底凸的河道砂体最为有利。此外,河道内部构型单元,如侧积层的发育会加剧储集层非均质性,其数量越少越有利;而侧积体倾角则控制了流体各向异性,本区 x 小层普遍小于 4° ,在此范围内倾角相对更大更有利于渗流。



a—沉积相图；b—砂岩厚度图；c—有效厚度图

图 1 松辽盆地乾深区块 x 小层基础地质图件

Fig. 1 Basic geological maps of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

1.2 油藏因素

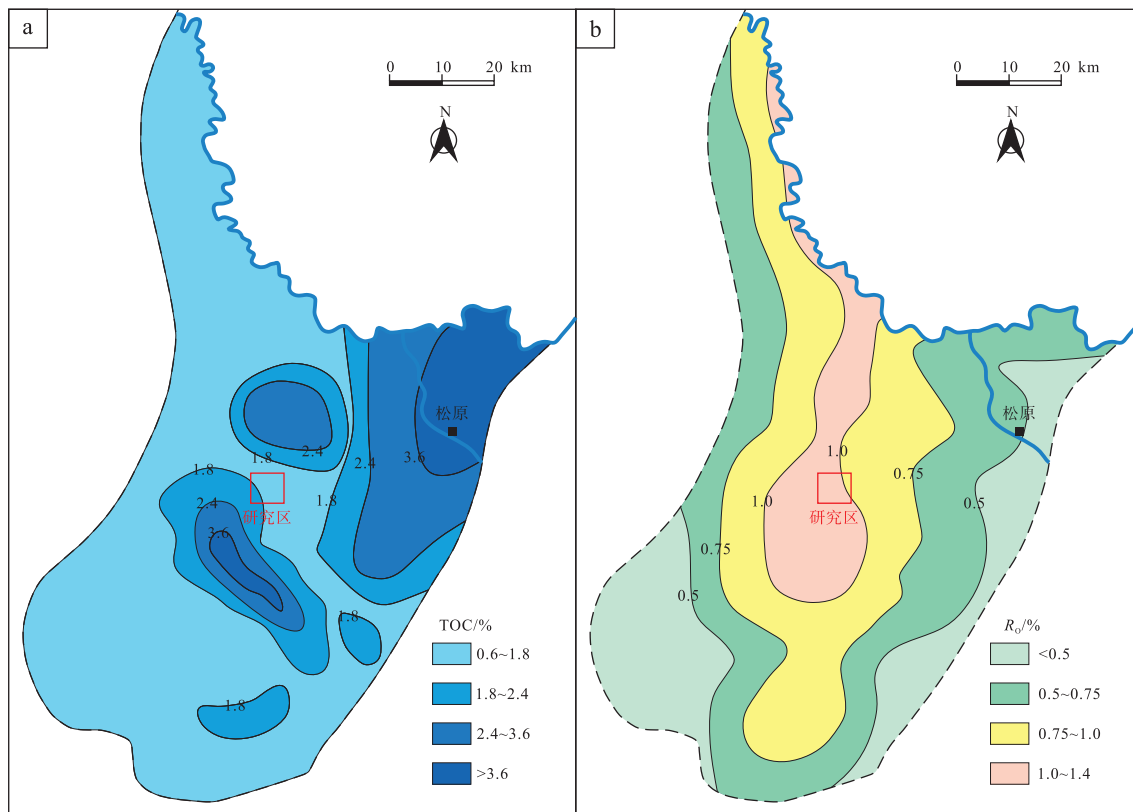
油藏因素本次聚焦于 4 项地质参数，这些参数共同构成了油气成藏与开采的完整体系。含油性是储集层内部流体性质的直接体现，是决定储集层是否具有开采价值的重要依据。“富含油”是确定有利区的首选目标，而“油浸”则是实施增产措施、实现效益开发的重要现实目标。烃源岩总有机碳含量（TOC）是评价烃源岩生烃潜力的基础指标，本区下伏青一段烃源岩 TOC 含量普遍大于 2.0%（图 2-a），达到了优质烃源岩标准，为上覆储集层提供了充足的油源保障。镜质体反射率（ R_0 ）作为烃源岩热演化程度的关键指标，本区 0.7%~1.0% 的 R_0 值范围表明烃源岩正处于生油窗主峰期（图 2-b），保证了大量液态烃的生成与排出。地层压力系数是表征地层能量状态的重要指标，本区 0.9~1.1 的压力系数范围属于常压—弱超压系统，虽然缺乏强超压的驱动优势，但仍能维持有效的油气运移和产能，保证了基本的开发条件（黄越等，2024）。这 4 项参数依次回答了“是否有油”、“是否有源”、“是否成熟”和“是否有能量”的关键问题，形成了完整的油藏评价体系，是界定有利区的核心油藏依据。

1.3 构造因素

研究区整体为岩性油藏，构造因素在本区贡献权重相对较低，但仍对油藏调整与油气富集产生影响，研究重点关注构造部位高低与离控源断层远近 2 个方面。构造高部位是油气在浮力作用下的优势聚集区；而少数延伸至下伏青一段烃源岩的控源断层（图 3），可作为关键的油气运移通道，距离其越近，油气充注效率越高，越有利于成藏。

1.4 有利区评价指标体系

基于上述对致密砂岩储集层有利区主控地质因素的系统分析，以松辽盆地南部乾深区块青三段 x 小层为例，构建了有利区综合评价指标体系及等级划分表（表 1）。由于各评价因素的地质特征存在差异，为便于定量评价，参照胡贝等（2023）所用方法将本区各影响因素分为 4 等，赋予 1、3、9、27，赋值越高，表征该指标对有利区形成的贡献越大。将有利区等级划分为三级：一类有利区，即储集层质量优、油气充注充分、产能潜力大的核心甜



a—TOC 分布图; b— R_o 分布图

图 2 松辽盆地乾深区块青一段烃源岩地球化学特征分布图 (据 Liu, 2023; 有修改)

Fig. 2 Distribution map of geochemical characteristics of source rocks of the Member 1 of Qingshankou Formation in Qianshen Block of Songliao Basin (modified from Liu, 2023)

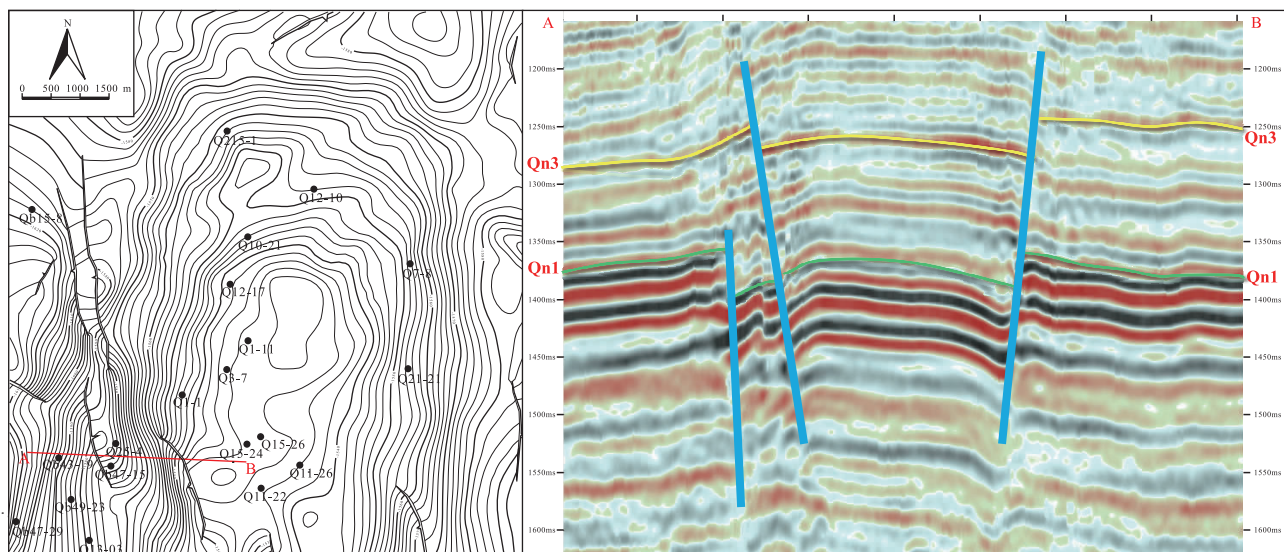


图 3 松辽盆地乾深区块 x 小层顶面构造图及过 AB 线地震剖面

Fig. 3 Top structure map and seismic profile along AB line of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

点区; 二类有利区, 即具备基本成藏条件但在某些方面存在短板的有利区; 三类有利区, 即成藏条件

较差或勘探风险较高的潜在区。根据量化值进行划分: 一类(27分), 二类(9分, 3分), 三类(1分)。

表 1 松辽盆地乾深区块 x 小层有利区评价因素等级划分

Table 1 Factor grade division for favorable area evaluation of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

评价指标			有利区评价标准		
目标层	准则层	因素层	一类	二类	三类
有利区评价	沉积 C1	u_1 沉积相带	水下分流河道	水下分流河道侧缘/河口坝	水下天然堤
		u_2 砂岩厚度/m	≥ 6	2~6	≤ 2
		u_3 有效厚度/m	≥ 5	2~5	≤ 2
		u_4 砂体剖面形态	顶平底凸	不对称楔形/顶凸底平	极薄的楔形层
		u_5 侧积层	少	较少、较多	多
		u_6 侧积体倾角/(°)	≥ 3	2~3	≤ 2
	油藏 C2	u_7 含油性	富含油	油浸	油斑、油迹、荧光
		u_8 TOC/%	≥ 2	1~2	≤ 1
		u_9 R_0 /%	≥ 0.9	0.7~0.9	≤ 0.7
		u_{10} 地层压力系数	≥ 1.2	1~1.2	0.9~1
	构造 C3	u_{11} 构造高低/m	≥ -1540	-1580~-1540	≤ -1580
		u_{12} 控源断层发育远近/m	< 300	300~800	> 800

2 AHP-CRITIC 组合赋权法确定指标权重

2.1 层次分析法确定主观权重

层次分析法是一种定性定量相结合的多准则决策分析方法，由美国运筹学家 Saaty 在 20 世纪 70 年代提出。它的核心思想是将一个复杂的决策问题分解为目标、准则、因素等层次结构，通过两两比较的方式，将决策者的主观判断进行数量化，从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法（邓雪等，2012）。根据有利区 i 个影响因素指标构造初始评判矩阵，求出各指标所占权重。AHP 法求取主观权重的具体步骤如下：

1) 建立层次结构模型。根据决策目标、考虑因素和决策目标的相互关系，将其划分为最高层（致密砂岩储集层有利区综合评价）、中间层（沉积、油藏、构造）和最底层（沉积相带、砂岩厚度、砂体形态等 12 个单项指标）。

2) 构造判断矩阵。建立好层次模型结构后，邀请吉林油田不同项目组的 10 位技术骨干作为专家群体进行独立打分，专家均具有沉积学、储集层地质或油藏工程等相关背景，并在致密油气勘探开发领域具有多年实践经验。采用 1~9 标度法对各层次的因素两两分析比较，构造判断矩阵 A 。

$$A = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： n 为同层比较因素数。

3) 对矩阵 A 的各列归一化处理。

$$A'_{ij} = \frac{A_{ij}}{\sum_{i=1}^n A_{ij}}, (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (2)$$

4) 将处理后的矩阵按行求和。

$$\overline{W}_i = \sum_{j=1}^n A'_{ij}, (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (3)$$

5) 对算出的向量进行归一化处理。

$$\overline{W}_{i'} = \frac{\overline{W}_i}{\sum_{i=1}^n \overline{W}_i}, (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (4)$$

得到所求的特征向量 $W = [W_1 W_2 \cdots W_j]^T$ ，也是各评价指标的权重。

6) 计算判断矩阵 $\lambda_{\max i}$ 。

$$\lambda_{\max i} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{n W_i} \quad (5)$$

式中： $(AW)_i$ 为向量矩阵 $[AW]$ 的第 i 个分量。

7) 一致性检验。

为保证所求的权重结果是合理的、有效的，需要检验权重的计算方法。

$$CI_i = \frac{\lambda_{\max i} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$CR_i = \frac{CI_i}{RI} \quad (7)$$

判断矩阵的一致性好坏可由一致性比率 CR 反映, CR 越小, 一致性越好。如果 $CR < 0.1$ 则表示得到的权重是合理的, 如果 $CR > 0.1$ 则表示得到的权重是不合理的。本次计算 CR 全部小于 0.1。

2.2 CRITIC 法确定客观权重

CRITIC 法是一种客观赋权方法, 其权重确定完全依赖于指标数据本身所蕴含的信息, 从而有效规避主观偏见。该方法的核心在于从“指标对比强度”和“指标间冲突性”2 个维度综合衡量指标的信息承载量。对比强度由各指标的标准差来量化, 标准差越大, 表明该指标在不同样本中的波动性越强, 所传递的信息越丰富; 冲突性则基于指标之间的相关系数, 通常采用皮尔逊相关系数 PPMCC 来评估, 相关系数越小, 表明指标间的独立性越强、信息重叠度越低, 其相对重要性越高。该赋权法全面考虑各指标的差异性和关联性, 所得出的权重更加客观精确 (罗宁等, 2021)。需要指出的是, CRITIC 法在权重计算中引入指标间相关系数来刻画冲突性, 当某一指标与其他指标高度相关时, 其冲突性项降低, 从而使该指标的客观权重受到抑制。该机制在一定程度上能够削弱指标间相关导致的冗余信息重复计入问题, 提高综合评价的稳健性与客观性。CRITIC 法求取客观权重的具体步骤如下:

1) 假设有 n 个评价指标, 其中 $X_i = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, 有 m 个评价对象, 则有利区初始评判矩阵见式 (8)

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 个评价对象第 j 个指标所对应的评分数据 ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)。

2) 标准化矩阵 D 。根据 Z-score 方法标准化处理 X 得:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{式中: } d_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{s_j}, \quad \bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij},$$

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x})^2}$$

3) 计算变异系数。

$$h_j = \frac{s_j}{\bar{x}_j} \quad (10)$$

式中: h_j 表示第 j 个指标的变异系数。

4) 利用 PPMCC 计算出标准化矩阵 D 的相关系数矩阵 $B = (b_{jp})_{n \times n}$, 并算出独立性系数:

$$\eta_j = \sum_{p=1}^n (1 - b_{jp}) \quad (11)$$

5) 综合性系数 c_j 。

$$c_j = h_j \eta_j \quad (12)$$

6) 确定客观权重 w_j 。

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \quad (13)$$

2.3 组合权重

主观与客观赋权各有利弊, 为实现储集层有利区评价中主客观权重的科学融合, 采用乘法合成法将 AHP 所求得的主观权重 w_{Ai} 与 CRITIC 法所得的客观权重 w_{Cj} 进行组合。该方法实质上等价于对主、客观权重进行几何平均并归一化处理, 体现了专家判断与样本数据同时支持的指标更为重要的决策思想。当某指标在主观和客观赋权中均表现为高权重时, 其组合权重保持较高水平; 若两者存在明显分歧, 则乘积项相对较小, 相应组合权重受到抑制, 有利于削弱单一信息源对结果的过度影响, 突出主、客观信息的一致部分。与常见的线性加权组合相比, 该形式参数更少、计算更为简洁, 便于在油田企业中推广应用。需要注意的是, 乘法合成法并非在所有情形下都适用。当某一指标在主观赋权中被赋予极低权重, 而在客观赋权中权重较高时, 其乘积可能趋近于零, 导致该指标在组合权重中被过度削弱, 从而使结果偏向极端。因此, 乘法合成更适用于主、客观权重差异相对有限、且不希望某一

信息源单方面拉高某指标重要性的情形。文中算例，各指标的 AHP 与 CRITIC 权重幅值相近、差异不大，组合后权重仍分布于合理区间内，未出现趋近于 0 的指标，表明乘法合成在本研究中的应用是稳定且合理的。

该方法首先对两类权重向量进行规范化处理，随后逐指标计算其主观权重与客观权重的乘积，并通过归一化处理得到综合权重 $w_{0j} = (w_{01}, w_{02}, \dots, w_{0j})$ ，即

$$w_{0j} = \frac{w_{Ai}w_{Cj}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{Ai}w_{Cj}} \quad (14)$$

式中： w_{0j} 代表评价指标的组合权重， w_{Ai} 代表主观权重， w_{Cj} 代表客观权重。

3 构建组合赋权—云模型有利区评价模型

在通过 AHP-CRITIC 组合赋权法科学确定指标权重的基础上，评价工作的下一核心环节在于如何准确计算各指标相对于不同评价等级的隶属度，以处理有利区评价中固有的模糊性与随机性。传统方法在此环节常依赖主观经验或硬性函数划分，精度欠佳。为此，本研究引入能够天然融合模糊和随机属性的云模型。本节将详尽阐述其理论内核，揭示期望 (E_x)、熵 (E_n)、超熵 (H_e) 3 个数字特征共同刻画地质概念的内在机理，并演示其算法流程，为实现从精确数据到柔性概念的有利区综合评价提供理论依据与方法支撑。

3.1 云模型生成

假设存在一个定量论域 U 表示精确值， $x \in U$ ， x 在 T 的范围内随机出现，则任意一个 x 对 T 的隶属度是具有稳定倾向的随机数 U ， x 在论域 U 上的分布则为云，即 $T(x)$ ，其中 x 为一个云滴，多个云滴构成云。

通过 MATLAB 软件的正态云发生器来实现有利区评价的定性定量转换，计算有利区评价指标的隶属度：

$$\mu_i = \exp \left[-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E_n^2} \right] \quad (15)$$

式中： μ_i 表示隶属度。

云的特征值包括期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 。 E_x

为期望值，是云滴在论域中的中心位置，熵 E_n 表示定性概念不确定的程度，超熵 H_e 则是熵的熵。则有利区评价指标隶属于不同等级的数字特征值可依据式 (16) 计算。

$$\begin{cases} E_x = \frac{c_{\max} + c_{\min}}{2} \\ E_n = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{2\sqrt{2\ln 2}} \\ H_e = \frac{E_n}{10} \end{cases} \quad (16)$$

式中： $c_{\max}$ 、 $c_{\min}$ 分别代表同一等级标准的上限值、下限值。

需要说明的是，作者并未采用均匀分布假设，式(16)中 E_x 、 E_n 和 H_e 的确定基于式 (15) 而来。对于某一评价等级，其评分区间为 $[c_{\min}, c_{\max}]$ 。为使等级边界在隶属度意义上具有明确的模糊边界，本文将区间端点视为该等级的半隶属度边界，即：

$$\mu(c_{\min}) = \mu(c_{\max}) = \mu_0 \quad (17)$$

且端点关于期望对称，则

$$E_x = \frac{c_{\max} + c_{\min}}{2} \quad (18)$$

将 $c_{\max} - E_x = 0.5(c_{\max} - c_{\min})$ 代入隶属函数可得：

$$E_n = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{2\sqrt{-2\ln \mu_0}} \quad (19)$$

当 $\mu_0 = 0.5$ 时， $[c_{\min}, c_{\max}]$ 对应正态云的高宽区间，即云滴在该区间内具有较高集中度，由此得到本文式 (16) 所采用的 E_n ：

$$E_n = \frac{c_{\max} - c_{\min}}{2\sqrt{2\ln 2}} \quad (20)$$

超熵 H_e 描述熵 E_n 的波动幅度。为保证标准云形态稳定且不过度发散，通常取 $H_e \ll E_n$ 以引入适度随机扰动而不改变等级边界的主控约束。参考已有云模型评价研究中的常用设置 (胡贝等, 2023)，并结合本文评分区间尺度，取：

$$H_e = kE_n, k = 0.1 \quad (21)$$

该取值可在保证云滴离散度适中的同时，体现地质概念的不确定性。

因此，式 (16) 并非对区间上下限的经验套用，而是由正态云隶属函数在等级边界处的隶属度阈值约束推导得到的标准云参数确定方式。当研究对象具备充足观测样本时，可进一步采用逆向云发

生器由样本统计量反演 (E_x, E_n, H_e), 以提升参数的统计依据与可解释性。

根据公式 (16) 算得有利区评价指标云模型的数字特征值 (表 2)。

表 2 松辽盆地乾深区块 x 小层云模型数字特征值

Table 2 Digital characteristics values of cloud model of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

有利区等级	(E_x, E_n, H_e)
一类	(18.0, 7.643, 0.7643)
二类	(6.0, 2.548, 0.2548)
三类	(2.0, 0.850, 0.0850)

在已知云模型的数字特征值的基础上, 通过 MATLAB 软件生成的 3 朵正态云, 且分别对应一个有利区等级 (图 4)。横轴表示有利区评价指标值, 纵轴表示隶属度, 可以直观地表示评价指标评分分值、状态等级与隶属度三者之间的关系。

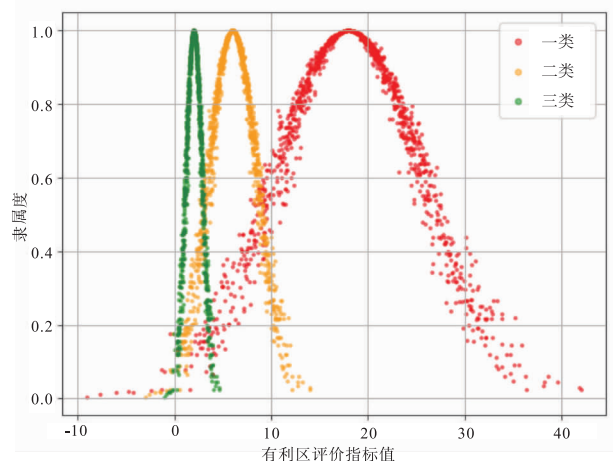


图 4 松辽盆地乾深区块 x 小层标准云图

Fig. 4 Standard cloud map of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

根据正态云发生器的算法, 分别计算有利区的各评价指标数据 x_j 隶属于云 i 的隶属度 $\mu_{ij} = (i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 12)$ 。再结合各评价指标的组合权重, 算出评价对象的综合隶属度 U_i 表达式为

$$U_i = \sum_{j=1}^{12} \mu_{ij} w_{oj} \quad (22)$$

式中: U_i 代表综合隶属度, μ_{ij} 代表隶属度, w_{oj} 代表各指标组合权重。有利区等级 M 判别模型为

$$M = \max \{U_1, U_2, U_3\} \quad (23)$$

3.2 评判流程

基于 AHP-CRITIC 组合赋权法与云模型的有利区综合评价流程如下: (1) 首先对各项评价指标进行量化处理, 建立指标赋分与评级标准, 确定各评价等级对应的分值区间; (2) 利用 AHP 法确定主观权重, 同时采用 CRITIC 法计算客观权重, 通过组合赋权法得到综合权重; (3) 依据各评价等级的分值区间 ($c_{\min}, c_{\max}$), 按式 (16) 构建各等级标准云的数字特征 (E_x, E_n, H_e); (4) 将待评价井点的各指标分值输入正向云发生器, 计算其对各等级标准云的隶属度, 并按式 (22) 加权得到综合隶属度; (5) 根据最大隶属度原则, 结合综合确定度计算结果, 最终判定不同井位所处的有利区类型。整个过程通过 MATLAB 编程实现 (图 5)。

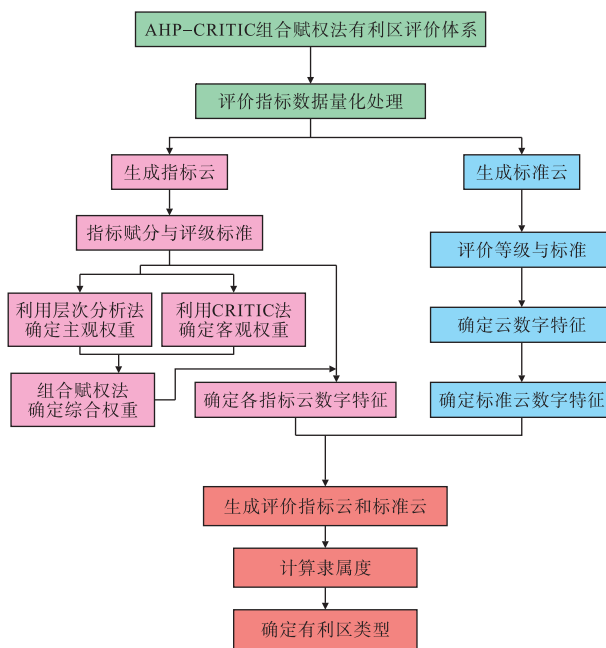


图 5 松辽盆地乾深区块 x 小层有利区综合评判流程

Fig. 5 Comprehensive evaluation criteria of favorable areas of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

4 实例应用

4.1 有利区评价指标量化

为验证基于 AHP-CRITIC 组合赋权法与云模型的有利区评价方法的有效性与实用性, 本研究选取松辽盆地南部乾安油田乾深区块青三段 x 小层作为典型实例进行应用分析。在研究区内系统选取 20 口具有代表性的样本井, 针对沉积相带、砂岩厚

度、有效厚度、砂体剖面形态、含油性、地层压力系数等 12 项关键评价因素进行系统量化评分（表 3）。通过对这些井点各项参数的量化表征，为后续云模型计算与有利区综合判定提供了详实的数据基础，也为评价模型的准确性检验创造了条件。

4.2 组合权重的确定

在完成各井有利区评价指标的定量评分基础上，采用 AHP-CRITIC 组合赋权法进行权重计算并按权重大小进行排序，有利区评价指标的组合权重见表 4。可以看出，各评价指标权重排序为 u_1 沉积相带 $> u_7$ 含油性 $> u_3$ 有效厚度 $> u_{10}$ 地层压力系数 $> u_{12}$ 控源断层发育远近 $> u_{11}$ 构造高低 $> u_2$ 砂岩厚度 $> u_8$ TOC $> u_6$ 侧积体倾角 $> u_5$ 侧积层 $> u_9$ R_o $> u_4$ 砂体形态。由各指标权重结果可以看出，沉积相带、含油性与有效厚度被确定为影响有利区评价的 3 个核心主导因素。组合权重有效融合了主客观信息，例如沉积相带的主观权重显著高于其客观权重，组合结果充分尊重了地质认识中“相控”的核心地位；而构造高低则呈现出相反趋势，其客观权重远高于

主观权重，表明实测数据揭示了其被经验低估的实际区分能力，组合权重对此进行了合理修正。该权重分配结果科学地统一了地质规律与数据特征，为后续云模型评价提供了可靠依据。

4.3 综合评价云图绘制

根据各评价指标的组合权重与量化评分数据，首先利用式（16）确定“一类、二类、三类”评价等级对应的标准云数字特征（ E_x , E_n , H_e ），随后将各井 12 项指标分值输入正向云发生器，计算其对不同等级标准云的隶属度，并按式（22）求得各等级的综合隶属度，从而绘制综合评价云图（图 6），实现指标评分与定性等级之间不确定性映射关系的可视化表达。综合评价云图能够直观显示研究区不同井位隶属于各等级的倾向性与分布特征，为有利区分类与勘探决策提供依据。

4.4 有利区等级评价结果

在综合云图的基础上，使用隶属度来进一步确定有利区等级。以 Qb49-23 井为例说明有利区综

表 3 松辽盆地乾深区块 x 小层有利区评价各井指标量化评分

Table 3 Quantitative scoring of each well's indicators for favorable area evaluation of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

井号	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}
Qb49-23	27	27	9	27	27	27	3	27	9	1	1	3
Q11-26	9	27	27	9	9	27	3	9	9	1	27	1
Qb43-19	27	9	9	27	27	27	3	27	27	1	1	3
Q1-1	27	9	9	27	27	27	9	9	9	3	9	3
Q10-21	9	3	3	9	9	9	27	9	9	3	9	1
Q3-7	9	27	27	9	9	9	27	9	9	1	27	1
Q1-11	9	9	9	9	3	9	3	9	9	1	27	1
Q21-21	3	3	3	3	3	3	3	9	3	1	9	1
Q12-17	27	9	27	27	27	27	27	9	9	3	9	1
Q25-4	9	3	3	9	1	27	3	9	9	1	1	9
Q12-10	3	3	3	3	3	1	3	9	9	3	3	1
Qb15-8	27	9	9	27	27	27	3	27	27	3	1	3
Q13-03	9	9	3	9	3	9	3	9	9	1	3	1
Q7-8	27	9	27	27	27	27	3	9	9	3	9	1
Qb47-29	1	3	3	1	3	3	3	9	9	1	1	1
Q11-22	27	27	27	27	27	3	9	9	9	1	27	1
Q15-26	9	3	3	9	3	9	3	9	9	1	9	1
Qb47-15	27	9	9	27	27	9	3	27	9	1	1	27
Q15-24	27	9	9	27	27	9	3	9	9	1	27	1
Q215-1	27	27	9	27	27	3	9	9	9	3	9	1

表 4 松辽盆地乾深区块 x 小层有利区评价各指标权重
Table 4 Weight of each indicator for favorable area evaluation
of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

指标	客观权重	主观权重	组合权重
u_1 沉积相带	0.084	0.260	0.253
u_7 含油性	0.108	0.145	0.182
u_3 有效厚度/m	0.076	0.142	0.124
u_{10} 地层压力系数	0.103	0.096	0.114
u_{12} 控源断层发育远近/m	0.068	0.082	0.064
u_{11} 构造高低/m	0.129	0.041	0.061
u_2 砂岩厚度/m	0.082	0.055	0.053
u_8 TOC/%	0.097	0.045	0.051
u_6 侧积体倾角/(°)	0.076	0.038	0.034
u_5 侧积层	0.065	0.044	0.032
$u_9 R_o$ /%	0.048	0.034	0.019
u_4 砂体形态	0.064	0.018	0.014

合评价过程, 将该井各评价指标的量化数据输入已建立的一维云模型, 计算得到各指标隶属于“一类”、“二类”和“三类”有利区的隶属度(表 5)。

将表 4 中的组合权重与表 5 中的各指标确定度代入综合评判公式(22)中, 计算得到该井的综合隶属度 $U = (0.455, 0.115, 0.059)$ 。由公

式(23)得 $U(\text{一类}) > U(\text{二类}) > U(\text{三类})$, 根据最大隶属度原则, 判定该井属于“一类”有利区。按照此方法, 依次计算 20 口井的综合隶属度及有利区等级判定结果(表 6)。

由表 6 评价结果可知, 研究区选取的 20 口井中有 12 口被判定为一类有利区, 5 口为二类有利区, 3 口为三类有利区。通过这 20 口井可以看出云模型判别结果与隶属度判别结果基本吻合, 较前人认识符合率达到了 95%。为进一步量化模型判别结果与前人认识的一致性, 以表 6 中前人认识(基于前期沉积相解释、含油性资料及试油/试采等综合成果)作为参照, 构建三分类混淆矩阵

$$M = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

并计算 Cohen's Kappa 系数:

$$\kappa = (P_o - P_e) / (1 - P_e) \quad (25)$$

式中: P_o 为观察一致率, P_e 为随机一致率, κ 为 Kappa 系数。

通过计算可得: $P_o = 0.95$, $P_e = 0.45$, $\kappa = 0.91$, 达到高度一致水平, 进一步表明本模型评价

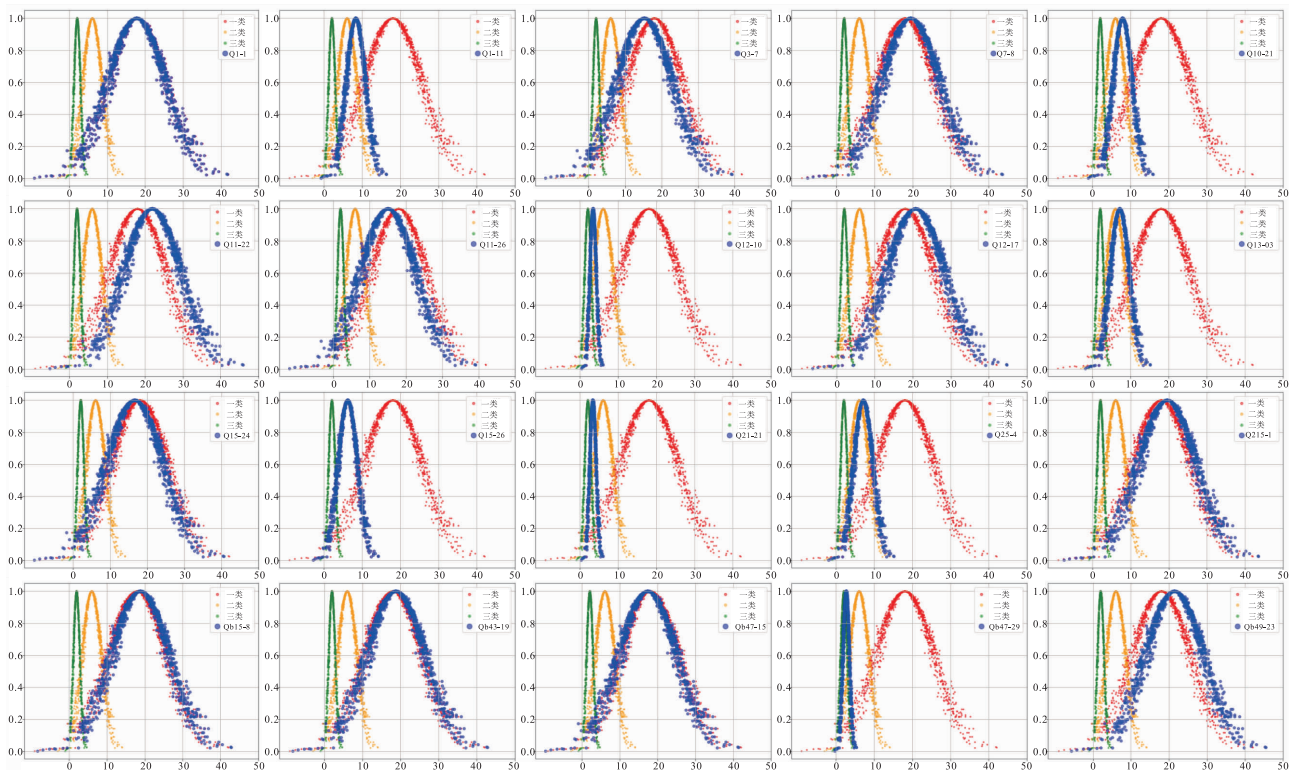


图 6 松辽盆地乾深区块 x 小层 20 口样本井综合指标云图

Fig. 6 Comprehensive index cloud map of 20 sample wells of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

表 5 松辽盆地乾深区块 x 小层 Qb49-23 井的各指标隶属度

Table 5 Favorable area of various indicators for well Qb49-23 of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

隶属度	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}
一类	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.500	0.146	0.500	0.500	0.084	0.146	0.146
二类	0	0	0.500	0	0	0	0.500	0	0.500	0.146	0.146	0.500
三类	0	0	0	0	0	0	0.500	0	0	0.500	0.500	0.500

表 6 松辽盆地乾深区块 x 小层 20 口井的有利区评价结果

Table 6 Favorable area evaluation results of 20 wells in study area of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

测点编号	综合隶属度			判别结果	云图判别	前人认识
	一类	二类	三类			
Qb49-23	0.455	0.115	0.059	一类	一类	一类
Q11-26	0.462	0.295	0.049	一类	一类	一类
Qb43-19	0.455	0.188	0.058	一类	一类	一类
Q1-1	0.483	0.248	0.023	一类	一类	一类
Q10-21	0.377	0.468	0.171	二类	二类	二类
Q3-7	0.481	0.299	0.023	一类	一类	一类
Q1-11	0.439	0.474	0.280	二类	二类	二类
Q21-21	0.144	0.350	0.465	三类	三类	三类
Q12-17	0.482	0.160	0.023	一类	一类	一类
Q25-4	0.328	0.428	0.232	二类	二类	二类
Q12-10	0.147	0.339	0.458	三类	三类	二类
Qb15-8	0.457	0.200	0.058	一类	一类	一类
Q13-03	0.392	0.483	0.147	二类	二类	二类
Q7-8	0.464	0.186	0.049	一类	一类	一类
Qb47-29	0.148	0.343	0.458	三类	三类	三类
Q11-22	0.459	0.105	0.053	一类	一类	一类
Q15-26	0.334	0.483	0.229	二类	二类	二类
Qb47-15	0.460	0.229	0.051	一类	一类	一类
Q15-24	0.462	0.253	0.049	一类	一类	一类
Q215-1	0.461	0.183	0.053	一类	一类	一类

结果具有较好的可靠性与可推广性。

据有利区判别结果绘制乾深区块 x 小层有利区分布图(图 7)，据此绘制的有利区分布图清晰展示了各类有利区在研究区内的空间展布规律：一类有利区主要沿优势沉积相带与高构造部位呈条带状集中分布，二类有利区作为有效补充分布于其周缘，三类区则分散于构造-沉积条件相对较差的区域。该预测结果与现有地质认识高度一致，证明了基于组合赋权与云模型的评价方法在致密砂岩储集层甜点预测中的有效性与适用性，为研究区下一步井位部署与勘探决策提供指导。未来，随着样本井数据

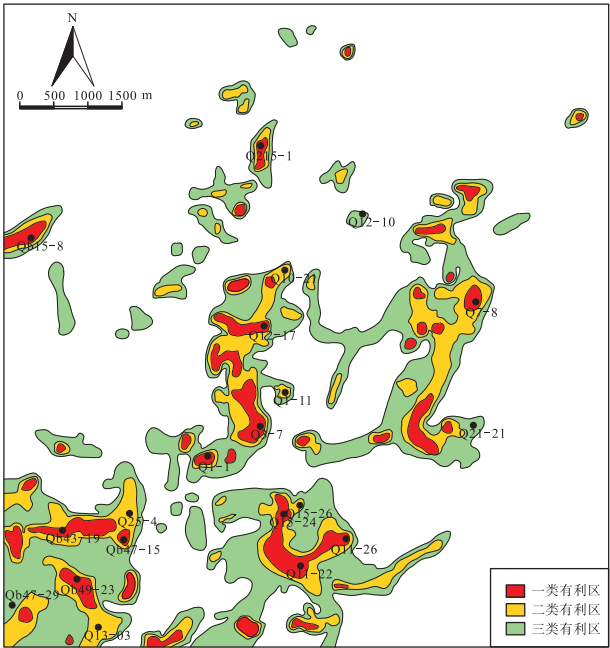


图 7 松辽盆地乾深区块 x 小层有利区分布图

Fig. 7 Distribution map of favorable areas of the x subunit in Qianshen Block of Songliao Basin

的进一步丰富，此模型有望实现从多井统计分析到单井点精准预测的跨越，为勘探决策提供更为高效的智能工具。

5 结论

针对松辽盆地南部乾安油田乾深区块青三段 x 小层致密砂岩储集层地质特征，构建并应用了一套基于 AHP-CRITIC 组合赋权法与云模型有利区综合评价方法，主要获得以下结论：

1) 系统分析了沉积、油藏、构造 3 大类共 12 项关键地质参数对有利区的控制作用，建立了包含三级有利区等级的评价标准。创新性地将主观的 AHP 与客观的 CRITIC 法通过乘法合成进行组合，既尊重了相控储集层等核心地质规律，又充分挖掘了各参数本身的客观信息，使权重分配更为合理。

在此基础上,引入正态云模型,基于评价等级分值区间并结合边界隶属度阈值约束推导标准云参数(E_x 、 E_n 、 H_e),有效处理了定性概念与定量评分转换中的模糊性与随机性,形成了完整的不确定性评价方法体系。

2) 组合权重计算结果表明,沉积相带、含油性和有效厚度是影响乾深区块 x 小层有利区评价的 3 个最核心指标。应用该模型对 20 口样本井进行评价,识别出一类有利区 12 口,二类 5 口,三类 3 口,与前人认识符合率达到 95%,Kappa 检验一致性系数 $\kappa=0.91$ 。据此绘制的有利区分布图清晰显示,一类区主要沿优势沉积相带与高构造部位集中分布,与现有地质认识高度一致,验证了模型的准确性与实用性。

3) 本研究证实 AHP-CRITIC-云模型耦合模型能够有效克服传统方法在权重确定和隶属度计算中的局限,有效提升致密砂岩储集层有利区预测的科学性和可靠性。该模型框架具有一定普适性,通过调整评价指标体系与标准,可为同类复杂油气藏的甜点预测与勘探决策提供技术借鉴。未来随着研究区井数与数据的积累,可对模型进行持续优化,进一步提升其预测精度与应用价值。

参考文献 (References)

- 陈萍,张延飞,刘星星,丁木华,虞俊. 2023. 基于正态云组合赋权的城市生态环境质量综合评价. 科技管理研究,43(4): 68-74. [Chen P, Zhang Y F, Liu X X, Ding M H, Yu J. 2023. Comprehensive evaluation of urban ecological environment quality based on normal cloud combination empowerment. Science and Technology Management Research, 43(4): 68-74]
- 崔映坤,鲍志东,李忠诚,赵家宏,姜福杰,王天煦,韩昊天,姜振昌,王腾宇. 2025. 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层浅水曲流河三角洲沉积与演化特征. 古地理学报,27(5): 1207-1226. [Cui Y K, Bao Z D, Li Z C, Zhao J H, Jiang F J, Wang T X, Han H T, Jiang Z C, Wang T Y. 2025. Sedimentary characteristics and evolution of shallow-water meandering river delta in Fuyu oil layer, southern Fuxin uplift zone, Songliao Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 27(5): 1207-1226]
- 邓雪,李家铭,曾浩健,陈俊羊,赵俊峰. 2012. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究. 数学的实践与认识,42(7): 93-100. [Deng X, Li J M, Zeng H J, Chen J Y, Zhao J F. 2012. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications. Mathematics in Practice and Theory, 42(7): 93-100]
- 付金华,李士祥,郭茂恒,郭雯,周新平,刘江艳. 2022. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选. 石油学报,43(12): 1702-1716. [Fu J H, Li S X, Guo Q H, Guo W, Zhou X P, Liu J Y. 2022.

- Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica, 43(12): 1702-1716]
- 郭金玉,张忠彬,孙庆云. 2008. 层次分析法的研究与应用. 中国安全科学学报,(5): 148-153. [Guo J Y, Zhang Z B, Sun Q Y. 2008. Study and applications of analytic hierarchy process. China Safety Science Journal, (5): 148-153]
- 何欣宇,郭海湘,刘雅凝,石咏,王墩,窦杰. 2025. 基于平急双态—二维云模型的高原高寒地区地震应急协同能力评价. 安全与环境工程,32(2): 76-88. [He X Y, Guo H X, Liu Y N, Shi Y, Wang D, Dou J. 2025. Evaluation of earthquake emergency coordination capacity in highland and alpine areas based on normal-emergency-state and two-dimensional cloud model. Safety and Environmental Engineering, 32(2): 76-88]
- 胡贝,李希建,代芳瑞,汪圣伟. 2023. 基于组合赋权和云模型的危岩体危险性评价. 人民长江,54(1): 145-150. [Hu B, Li X J, Dai F R, Wang S W. 2023. Risk assessment of dangerous rock masses based on combined weighting and cloud model. Yangtze River, 54(1): 145-150]
- 黄越,常健,邱楠生,林铁锋,付秀丽,唐博宁,李军辉. 2024. 松辽盆地齐家—古龙凹陷青山口组压力场特征和超压成因. 石油学报,45(12): 1800-1817. [Huang Y, Chang J, Qiu N S, Lin T F, Fu X L, Tang B N, Li J H. 2024. Pressure field characteristics and overpressure geneses of Qingshankou Formation in Qijia-Gulong sag, Songliao Basin. Acta Petrolei Sinica, 45(12): 1800-1817]
- 李德毅. 2009. 网络时代人工智能研究与发展. 智能系统学报,4(1): 1-6. [Li D Y. 2009. AI research and development in the network age. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 4(1): 1-6]
- 李德毅,刘常昱. 2004. 论正态云模型的普适性. 中国工程科学,(8): 28-34. [Li D Y, Liu C Y. 2004. Study on the universality of the normal cloud model. Strategic Study of CAE, (8): 28-34]
- 李海林,周文浩,吴炳毅,万校基. 2025. 基于云模型理论的数据预处理及校准分析方法研究. 系统工程理论与实践,45(9): 3124-3137. [Li H L, Zhou W H, Wu B Y, Wan X J. 2025. Research on data preprocessing and calibration method based on cloud model theory. Systems Engineering-Theory & Practice, 45(9): 3124-3137]
- 李磊,鲍志东,李忠诚,孙圆辉,赵晨旭,陈建文,崔映坤,陈港. 2023. 致密砂岩气储层微观孔隙结构与分形特征: 以松辽盆地长岭气田登娄库组为例. 天然气地球科学,34(6): 1039-1052. [Li L, Bao Z D, Li Z C, Sun Y H, Zhao C X, Chen J W, Cui Y K, Chen G. 2023. Microscopic pore structure and fractal characteristics of tight sandstone gas reservoir: a case study of Denglouku Formation in Changling Gas Field, Songliao Basin. Natural Gas Geoscience, 34(6): 1039-1052]
- 李新坡,郑秀娟,鲍志东. 2025. 古地理学与新质生产力关系探析. 古地理学报,27(3): 797-801. [Li X P, Zheng X J, Bao Z D. 2025. Analysis of relationship between palaeogeography and New Quality Productive Forces. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 27(3): 797-801]
- 罗宁,贺墨琳,高华,姜志筠,张天东,赵佳伟,吴国鼎,李智,胡钊. 2021. 基于改进的 AHP-CRITIC 组合赋权与可拓评估模型的配电网综合评价方法. 电力系统保护与控制,49(16): 86-96.

- [Luo N, He M L, Gao H, Jiang Z J, Zhang T D, Zhao J W, Wu G D, Li Z, Hu P. 2021. Comprehensive evaluation method for a distribution network based on improved AHP-CRITIC combination weighting and an extension evaluation model. *Power System Protection and Control*, 49(16): 86-96]
- 沈华, 杨亮, 韩昊天, 王颖, 邢济麟, 薛松, 刘红超. 2023. 松辽盆地南部油气勘探新领域、新类型及资源潜力. *石油学报*, 44(12): 2104-2121. [Shen H, Yang L, Han H T, Wang Y, Xing J L, Xue S, Liu H C. 2023. New fields, new types and resource potentials of oil gas exploration in southern Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(12): 2104-2121]
- 沈华, 胡佳, 杨光, 杨亮, 邵明礼, 杨克思, 王云鹤. 2025. 松辽盆地南部致密油气成藏特征及勘探潜力. *石油学报*, 46(1): 61-76. [Shen H, Hu J, Yang G, Yang L, Shao M L, Yang K S, Wang Y H. 2025. Accumulation characteristics and exploration potential of tight oil and gas in southern Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 46(1): 61-76]
- 王俊, 赵家宏, 腾军, 王天煦, 鲍志东, 张红静, 袁淑琴, 林艳波, 高银山. 2018. 浅水三角洲前缘砂体地震沉积学研究: 以松南乾安地区上白垩统青三段为例. *沉积学报*, 36(3): 570-583. [Wang J, Zhao J H, Teng J, Wang T X, Bao Z D, Zhang H Q, Yuan S Q, Lin Y B, Gao Y S. 2018. Seismic sedimentology research on shallow water delta front sandbodies: a case study on Member 3 of upper Cretaceous Qingshankou Formation in Qian'an area, south Songliao Basin, NE China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(3): 570-583]
- 王书黎, 王锦国, 张承森, 张喆安, 帕尔哈提·凯山, 刘龙成. 2025. 基于二维云模型的测井储层流体评价方法研究: 以塔里木盆地库车坳陷为例. *油气藏评价与开发*, 15(3): 434-442, 454. [Wang S L, Wang J G, Zhang C S, Zhang Z A, Parhat K, Liu L C. 2025. Study on well logging reservoir fluid evaluation method based on 2D cloud model: a case study of Kuqa Depression, Tarim Basin. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 15(3): 434-442, 454]
- 杨迪, 赵卫卫, 李富康, 肖颖, 吴佳, 朱星庆, 杨浩原, 白耀龙. 2025. 延安地区长7段页岩油富集主控因素及有利区优选. *地质科学*, 60(4): 1114-1125. [Yang D, Zhao W W, Li F K, Xiao Y, Wu J, Zhu X Q, Yang H Y, Bai Y L. 2025. Main controlling factors of shale oil enrichment in Chang 7 member of Yan'an area and optimal selection of favorable areas. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 60(4): 1114-1125]
- 杨洁, 王国胤, 刘群, 郭毅可, 刘悦, 涂文燕, 刘玉超. 2018. 正态云模型研究回顾与展望. *计算机学报*, 41(3): 724-744. [Yang J, Wang G Y, Liu Q, Guo Y K, Liu Y, Gan W Y, Liu Y C. 2018. Retrospect and prospect of research of normal cloud model. *Chinese Journal of Computers*, 41(3): 724-744]
- 张君峰, 徐兴友, 白静, 刘卫彬, 陈珊, 刘畅, 李耀华. 2020. 松辽盆地南部白垩系青一段深湖相页岩油富集模式及勘探实践. *石油勘探与开发*, 47(4): 637-652. [Zhang J F, Xu X Y, Bai J, Liu W B, Chen S, Liu C, Li Y H. 2020. Enrichment and exploration of deep lacustrine shale oil in the first Member of Cretaceous Qingshankou Formation, southern Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(4): 637-652]
- 张莉, 鲍志东, 林艳波, 陈玉明, 林晓海, 窦鲁星, 孔彬. 2017. 浅水三角洲砂体类型及沉积模式: 以松辽盆地南部乾安地区白垩系姚家组一段为例. *石油勘探与开发*, 44(5): 727-736. [Zhang L, Bao Z D, Lin Y B, Chen Y M, Lin X H, Dou L X, Kong B. 2017. Genetic types and sedimentary model of sandbodies in a shallow-water delta: a case study of the first Member of Cretaceous Yaojia Formation in Qian'an area, south of Songliao Basin, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5): 727-736]
- 张亚光, 李玉龙. 2016. 云模型在测井曲线分层中的应用. *计算机与数字工程*, 42(9): 1613-1616. [Zhang Y G, Li Y L. 2016. Application of cloud model in logging curve hierarchical. *Computer & Digital Engineering*, 42(9): 1613-1616]
- 张拥军, 唐俊. 2014. 基于云模型的网络安全态势分析与评估. *计算机工程与科学*, 36(1): 63-67. [Zhang Y J, Tang J. 2014. Analysis and assessment of network security situation based on cloud model. *Computer Engineering & Science*, 36(1): 63-67]
- 赵晨旭, 李忠诚, 郭世超, 鲍志东, 魏兆胜, 李磊, 王海龙. 2023. 松辽盆地南部部长岭断陷青一段陆相页岩地球化学和沉积环境特征. *特种油气藏*, 30(6): 55-61. [Zhao C X, Li Z C, Guo S C, Bao Z D, Wei Z S, Li L, Wang H L. 2023. Characteristics of geochemistry and depositional environment of terrestrial shales in the First Member of Qingshankou Formation of Changling Fault depression in the southern Songliao Basin. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 30(6): 55-61]
- 赵书强, 汤善发. 2019. 基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价. *电力自动化设备*, 39(3): 143-148, 162. [Zhao S Q, Tang S F. 2019. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS. *Electric Power Automation Equipment*, 39(3): 143-148, 162]
- 朱奕璇, 张忠民, 孙润明, 宋逸婷, 孙连浦, 孔凡军, 宿宇驰, 班舒悦, 李茗, 沈卫宏, 付志方, 马天碧, 鲍志东. 2025. 中亚北乌斯丘尔特盆地晚古生代构造演化与沉积特征. *古地学报*, 27(6): 1500-1515. [Zhu Y X, Zhang Z M, Sun R M, Song Y T, Sun L P, Kong F J, Su Y C, Ban S Y, Li M, Shen W Z, Fu Z F, Ma T B, Bao Z D. 2025. Tectonic evolution and sedimentary characteristics of the Late Paleozoic in North Ustyurt Basin, Central Asia. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(6): 1500-1515]
- 邹才能, 李士祥, 熊波, 杨智, 刘翰林, 张国生, 马锋, 潘松圻, 关春晓, 梁英波, 唐博宁, 吴松涛, 龙吟, 王子恒. 2025. 中国建设“能源强国”的内涵、路径与意义. *石油勘探与开发*, 52(2): 463-477. [Zou C N, Li S X, Xiong B, Yang Z, Liu H L, Zhang G S, Ma F, Pan S Q, Guan C X, Liang Y B, Tang B N, Wu S T, Long Y, Wang Z H. 2025. Connotation, pathways, and significance of building China into an “energy powerhouse”. *Petroleum Exploration and Development*, 52(2): 463-477]
- Liu B, Liu L B, Fu J, Lin T F, He J L, Liu X Z, Liu Y C, Fu X F. 2023. The Songliao Super Basin in northeastern China. *AAPG Bulletin*, 107(8): 1257-1297.

(责任编辑 郑秀娟)