

引用格式: 周锋, 黄仕林, 李晓明, 等. 基于层次分析法的致密气藏储层分类定量评价——以新场气田蓬莱镇组气藏为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(3): 468-474.

ZHOU Feng, HUANG Shilin, LI Xiaoming, et al. Quantitative evaluation of tight gas reservoir classification based on analytic hierarchy process: A case study of Penglaizhen Formation gas reservoir in Xinchang Gas Field[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(3): 468-474.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.03.016

基于层次分析法的致密气藏储层分类定量评价

——以新场气田蓬莱镇组气藏为例

周锋, 黄仕林, 李晓明, 廖开贵, 李勇

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 储层评价是致密砂岩气藏开发的基础, 评价结果的准确性直接影响气藏开发的潜力分析, 评价方法的选择影响到开发指标预测的可靠性、开发调整部署的科学性。为解决致密砂岩气藏储层评价影响因素多、主控因素不明确、参数敏感性未知、评价指标未量化等问题, 以川西新场气田蓬莱镇组气藏为例, 运用层次分析法理论, 建立定量分析模型, 将复杂问题简单化、定性问题定量化。方法优选地球物理、测井解释和地质基础等参数为准则指标, 通过构造判断矩阵、确定指标权重、一致性检验等步骤, 建立定量评价模型, 得到权值向量, 再利用真实井进行验证分析可采储量和无阻流量均与评价价值呈现较好的相关性, 说明研究方法具有较好的可靠性, 进一步明确了储层划分类型及标准。根据研究方法确定的气藏储层评价指标, 可以深化同区致密砂岩气藏开发“甜点”认识, 提升致密砂岩气藏储层预测及开发部署质量, 为同类气藏高效开发提供借鉴。

关键词: 储层评价; 致密砂岩; 判断矩阵; 参数优选; 层次分析法

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Quantitative evaluation of tight gas reservoir classification based on analytic hierarchy process: A case study of Penglaizhen Formation gas reservoir in Xinchang Gas Field

ZHOU Feng, HUANG Shilin, LI Xiaoming, LIAO Kaigui, LI Yong

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Southwest China Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Reservoir evaluation serves as a foundational aspect in the development of tight sandstone gas reservoirs, with the accuracy of these evaluations critically influencing potential development analyses. The selection of evaluation methodologies is pivotal in ensuring the reliability of development index predictions and the scientific integrity of adjustments and deployment strategies. Addressing the challenges inherent in evaluating tight sandstone gas reservoirs—such as numerous influencing factors, ambiguous controlling factors, unknown parameter sensitivity, and unquantified evaluation indices—this study develops a quantitative analysis model using the analytic hierarchy process (AHP). This approach simplifies complex issues and quantifies qualitative aspects, facilitating a more structured evaluation. Utilizing geophysical data, logging interpretation, and geological fundamentals as criterion indices, the study constructs a judgment matrix to establish a quantitative evaluation model. This involves determining index weights, conducting consistency tests, and deriving a weight vector. The model is then validated through correlation analysis between the recoverable reserves, open flow, and evaluation values of actual wells. Findings demonstrate the method's reliability and further refine the criteria for reservoir classification. The evaluation indices defined through this research enhance the understanding of “sweet spots” for tight sandstone gas reservoir development within the same region, improve the precision of reservoir prediction, and aid in the strategic deployment of development activities. Ultimately, this study offers valuable insights and a methodological framework for the efficient development of similar gas reservoirs.

Keywords: reservoir evaluation; tight sandstone; judgment matrix; parametric optimization; analytic hierarchy process

收稿日期: 2023-05-12。

第一作者简介: 周锋(1989—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事油气藏综合地质研究。地址: 四川省成都市高新区吉泰路688号, 邮政编码: 610041。E-mail: zhoufengcup@126.com

基金项目: 国家科技重大专项“薄层窄河道致密砂岩气藏气藏工程设计关键技术”(2016ZX05048)。

致密砂岩气藏的储层评价是气藏精细描述的重要目标,合理的储层评价有助于更深入、更综合地认识储层内部沉积环境、砂体展布、物性及含气性分布等特征,评价结果的准确性直接决定气藏开发效果,因此采用科学的方法进行致密砂岩气藏储层评价对油气资源的勘探开发具有重要意义^[1-4]。目前,储层评价的方法逐渐由定性向半定量、定量发展,考虑的因素也不尽相同,由单一经验参数向多因素综合分析发展。储层评价方法主要有灰色关联法、模糊数学法、聚类分析法、层次分析法等,这些方法的核心思想是通过数学算法确定不同评价指标的权重,得到主次影响因素并确定评价结果^[5-8]。灰色关联法适用于储层性质控制因素以1种或2种为主的气藏,相对简单;模糊数学法适用于资料丰富的气藏,模型结果不确定性较强;聚类分析法适用于井区资料复杂,参数调整繁琐、工作量大;层次分析法适用于有一定评价及产能建设认识基础的气藏,可以将复杂问题简单化。研究以新场气田侏罗系蓬莱镇组气藏为研究目标,综合考虑基础地质、地球物理和测井解释3类影响因素,采用多层级的层次分析法构建评价模型,对储层进行综合分类评价,定量分析储层品质影响主控因素,指导油气开发储层预测及部署研究。

1 研究区地质背景

新场气田位于四川盆地西部川西坳陷中段的一个北东东向的隆起带西段上,与整个隆起带一致,从晚三叠系以来经历了多期次构造运动,在燕山早中期运动已具雏形,燕山中晚期运动经历了重要的发展,后经喜山晚期运动改造定型,形成现今的形态^[9-12](图1)。气藏为平原河流相—湖相砂、泥岩沉积序列,含气砂体地震属性剖面上多表现为“强波谷、强波峰、低频、低波阻抗”的特征,测井响应特征为“三低两高”,即低自然伽马、低中子、低密度、高声波和较高电阻率。储层岩性主要为浅褐灰、浅绿灰色细粒长石岩屑石英砂岩,岩石碎屑成分以石英为主,岩屑次之,长石相对较低。

2 定量评价体系建立

2.1 层次分析法

致密砂岩气藏储层分类评价需考虑地球物理、测井、地质等不同类别参数,定量化研究时这些参数存在影响因素多、主控因素不明确、参数敏感性未

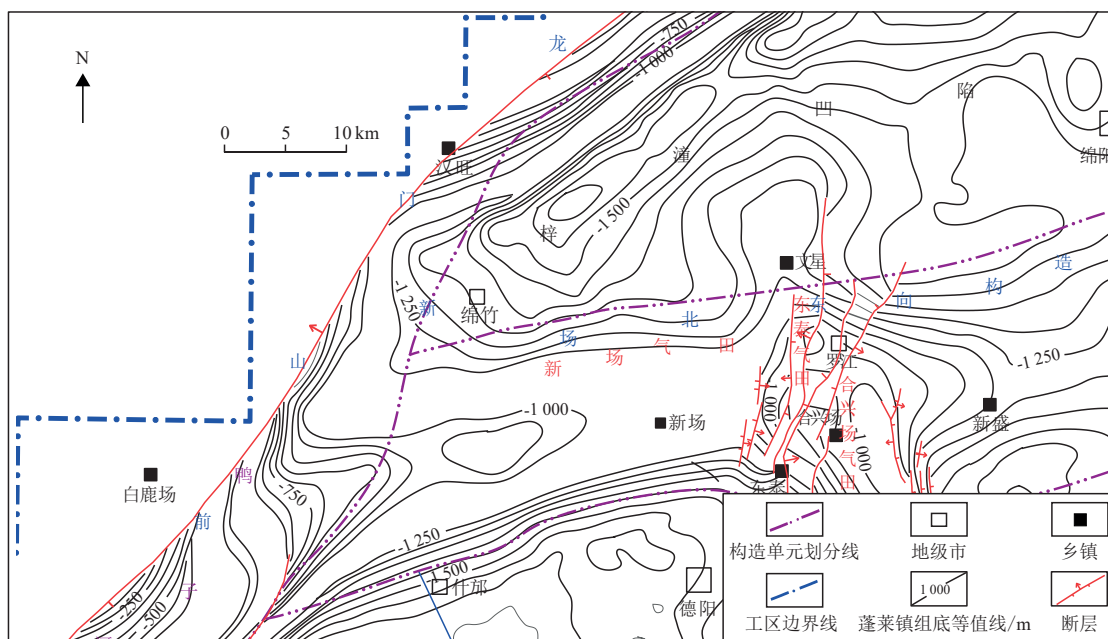


图1 新场气田区域构造

Fig. 1 Regional structure of Xinchang Gas Field

知、评价指标未量化等问题,因此,这类问题常常采用层次分析法进行研究^[13-16]。层次分析法是将定性问题量化处理常见的方法,核心思想是通过构建不同影响因素的多层次分析结构模型,利用定性指标模糊量化的方法计算因素的权重值,然后得到不同因素的影响程度及总目标的最终权重。该方法的优势是可以将复杂系统分解为若干子系统,并确定系统中各因素的相对重要性,具有较强的逻辑性和灵活性^[17-20]。

2.2 评价思路及流程

针对新场蓬莱镇组气藏储层,综合不同类型、不同值域参数,以井点实钻数据为依据,建立定量评价模型系统、全面开展储层评价。具体思路是:①在综合分析研究气藏地质特征的基础之上,优选评价指标;②将影响因素进行分类筛选,通过条理化、层次化归类,建立递阶层次模型;③在评价指标标准化的基础之上,构造判断矩阵并确定指标权重;④进行因素排序及一致性检验;⑤对评价结果进行验证分析(图2)。

2.3 评价指标优选

新场蓬莱镇组气藏储层品质受多因素影响,总结该气藏地质特点及建产效果,归纳筛选出评价指标主要受地球物理、测井响应和地质基础3类参数影响,并在此基础之上开展储层定量评价分析研

究^[21-26],如图3所示。

地球物理参数主要选取最大波谷振幅属性和最小波阻抗属性。振幅属性是最直接最常用的地震河道预测手段,在气藏开发中得到广泛应用。根据储层地震响应分析结果,结合多种属性对比分析,选择最敏感的最大波谷振幅属性开展河道砂岩储层预测,该属性可以定性预测储层展布。气藏砂体较薄,常规地震资料分辨率有限,难以精确刻画,叠后反演可以较好地解决这一问题,并且波阻抗反演保真度较高,应用最为成熟。因此,在高分辨率数据处理基础上进行叠后波阻抗反演,可获得分辨率更高的阻抗体,利用低阻抗属性可以更为直观地预测有利储层分布。

测井解释参数主要选取声波、电阻、孔隙度和渗透率。气藏含气层较多,岩性较为复杂,从粉砂到细砂岩均有,研究证实含气砂体测井响应主要表现为低自然伽马、低中子、低密度、高声波和较高电阻率的特征。地层含气将使声波时差增大、中子和密度测值降低,3种孔隙度曲线的组合能反映储层的储集性能和含气性,其声波、电阻率、密度是判别储层品质的主要电性指标。结合测试结果把测井解释分为气层、差气层、含气层、干层。在此基础上,利用对天然气响应特征反应明显的孔隙度、电阻率测井资料建立电性图版,再对这些图板进行统计分析,得到各类储层的含气模式及含气性测井值域。

地质基础参数主要选取构造位置、河道宽度和砂体厚度。气藏为定容封闭弹性气驱气藏,主体部位断层不发育,构造位置往往能影响气藏的含气性,同一河道、同井区高部位的含气性一般较低部位好,河道宽度和砂体厚度由于直接影响储量丰度,因此,储层定量评价有必要作为影响因素予以考虑,同一井区和气层的河道宽度和砂体厚度越大建产效果越好。

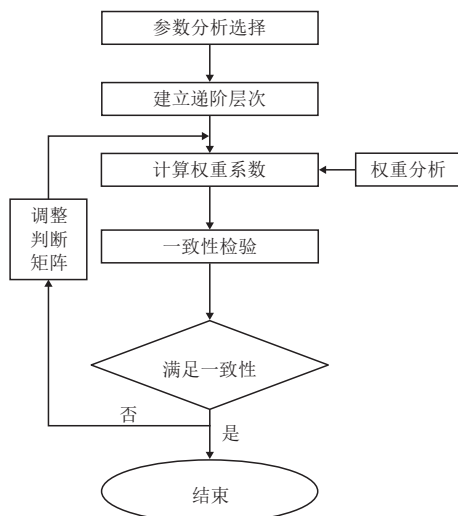


图2 层次分析法技术流程

Fig. 2 Technical flow of analytic hierarchy process

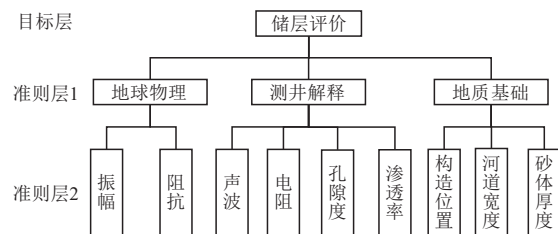


图3 评价指标优选及层次结构

Fig. 3 Evaluation index optimization and hierarchy

3 评价指标权重集的确定

3.1 构造判断矩阵及指标标准化

在确定各层次、各因素之间的权重时,如果只是定性的结果,则常常不容易被接受,因而需使用一致矩阵法,即不把所有因素放在一起比较,而是两两相互比较。采用相对尺度来尽可能减少性质不同的诸因素相互比较的困难,提高准确度,涉及判断矩阵标度含义如下:标度1代表两因素同等重要;标度3代表一个因素比另一个因素稍微重要;标度5代表一个因素比另一个因素较强重要;标度7代表一个因素比另一个因素强烈重要;标度9代表一个因素比另一个因素极端重要;标度2、4、6、8代表上述两相邻判断中间值。

对于不同研究对象,判断矩阵的取值标准并不统一,一般是在对主控因素有一定认识的基础之上进行,针对新场气田蓬莱镇组气藏,判断矩阵的标度可以理解为在值域范围内一个因素相对于另一个因素对建产效果(如无阻流量、可采储量)影响的倍数。例如,在A的值域范围内A对结果的影响相对于在B的值域范围内B对结果的影响是3倍,则取值3。结合权重分析法,对每个影响因素进行分类评价,并两两比较,构建判断矩阵,准则层1判断矩阵为:

$$A = (A_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1/3 & 1/4 \\ 3 & 1 & 1/2 \\ 4 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中:A为准则层1的判断矩阵; A_{ij} 为准则层1元素; n 为A的阶数。

准则层2判断矩阵为:

$$B1 = (B1_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} B1_{11} & \cdots & B1_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B1_{n1} & \cdots & B1_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$B2 = (B2_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} B2_{11} & \cdots & B2_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B2_{n1} & \cdots & B2_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & 2 \\ 2 & 1 & 1/2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 4 \\ 1/2 & 1/3 & 1/4 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$B3 = (B3_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} B3_{11} & \cdots & B3_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ B3_{n1} & \cdots & B3_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

式(2)一式(4)中: $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 为准则层2的判断矩阵; n 为 $B1$ 、 $B2$ 、 $B3$ 的阶数。

由于不同因素的参数范围不一致,不但有定量因素,还有定性因素,为使这些参数有效统一,以便后续计算,利用权重赋值法确定不同指标的4个赋值范围分别为:[0,2],[2,5],[5,8],[8,10]。评价结果见表1。

3.2 评价指标权重确定

将判断矩阵的各行向量进行几何平均,然后进行归一化,即得到各评价指标权重和特征向量。利用线性代数知识计算,求得准则层1、2特征向量。

$$V_{A_i} = (0.1220, 0.3196, 0.5584)^T \quad (5)$$

$$V_{B1i} = (0.5, 0.5)^T \quad (6)$$

$$V_{B2i} = (0.1601, 0.2772, 0.4673, 0.0954)^T \quad (7)$$

$$V_{B3i} = (0.5396, 0.2970, 0.1634)^T \quad (8)$$

式(5)一式(8)中: V_{A_i} 、 V_{B1i} 、 V_{B2i} 、 V_{B3i} 为准则层1、2特征向量。

利用准则层1、2计算结果可以进一步计算得到

表1 权重赋值法赋值标准

Table 1 Assignment criteria of weight assignment method

指标 赋值	地球物理		测井解释				地质基础		
	振幅	波阻抗/ (kg/m ³ ·m/s)	声波/ (μs/ft)	电阻/ (Ω·m)	孔隙度/ %	渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	构造位置	河道宽度/ m	砂体厚度/ m
[8,10]	≤-25 000	≤7 500	≥85	≥24	≥11	≥1	主体高部位	≥600	≥15
[5,8]	(-25 000,-20 000]	(7 500,8 000]	[80,85)	[18,24)	[10,11)	[0.6,1)	较高部位	[400,600)	[10,15)
[2,5]	(-20 000,-15 000]	(8 000,8 500]	[75,80)	[12,18)	[8,10)	[0.3,0.6)	一般部位	[300,400)	[5,10)
[0,2)	>-15 000	>8 500	<75	<12	<8	<0.3	低部位	<300	<5

注:1 ft=0.304 8 m。

最终权值向量。

$$V = (0.061\ 0, 0.061\ 0, 0.051\ 2, 0.088\ 6, 0.143\ 9, 0.030\ 5, 0.301\ 3, 0.165\ 8, 0.091\ 2)^T \quad (9)$$

式中: V 为最终权值向量。

3.3 一致性检验

对判断矩阵开展一致性检验,所谓一致性是指判断思维的逻辑一致性,如当甲比丙是强烈重要,而乙比丙是稍微重要时,显然甲一定比乙重要。这就是判断思维的逻辑一致性,否则判断就会有矛盾。以准则层1为例,进行一致性检验。

最大特征根为:

$$\lambda_{A_{\max}} = \sum_{i=1}^n \frac{(AV)_i}{nV_i} = 3.018\ 3 \quad (10)$$

式中: $\lambda_{A_{\max}}$ 为 A 的最大特征根。

一致性指标:

$$CI_A = \frac{\lambda_{A_{\max}} - n}{n - 1} = 0.009\ 2 \quad (11)$$

式中: CI_A 为 A 的一致性指标。

一致性比率为:

$$CR_A = \frac{CI_A}{RI} = 0.016 < 0.1 \quad (12)$$

式中: CR_A 为 A 的一致性比率; RI 为随机一致性指标。

以同样的方法算得, B_2 的最大特征值为 4.031 0, 一致性指标 0.010 3, 一致性比率 0.012 < 0.1; B_3 的最大特征值为 3.009 2, 一致性指标 0.004 6, 一致性比率 0.008 < 0.1。

所有判断矩阵均通过一致性检查,说明判断矩阵可靠,特征向量即为权值。

4 综合评价结果分析

从评价模型建立及计算结果可以看出:针对新场气田蓬莱镇组气藏选取的几个影响因素,构造位置、河道宽度、孔隙度为储层评价主控因素,砂体厚度、电阻次之,振幅、阻抗、声波和渗透率的影响最小。为验证评价结果的有效性,选取气藏实钻井参数进行计算分析,计算结果如表2所示。考虑到气井的建产效果一般直接反映在无阻流量和可采储量两

表2 新场气田蓬莱镇组气藏实例计算结果

Table 2 Calculation result of Penglaizhen Formation in Xinchang Gas Field

井号	地球物理		测井解释参数				地质基础参数			评价值 R
	振幅取值	阻抗取值	声波取值	电阻取值	孔隙度取值	渗透率取值	构造位置取值	河道宽度取值	砂体厚度取值	
X1	5	6	9	5	10	9	9	6	8	7.78
X2	8	8	8	5	9	8	9	9	8	8.35
X3	7	8	5	6	6	5	7	8	9	7.01
X4	8	8	6	9	9	9	8	6	6	7.65
X5	9	9	7	9	9	5	8	8	8	8.22
X6	6	6	7	8	7	5	6	9	4	6.66
X7	4	4	5	9	5	4	5	7	4	5.44
X8	7	7	8	8	8	8	5	8	4	6.61
X9	7	7	5	8	9	7	6	8	7	7.15
X10	5	6	7	8	8	7	7	6	8	6.98
X11	7	7	7	9	8	7	7	8	8	7.58
X12	6	6	6	7	7	7	5	6	7	6.06
X13	7	7	8	8	8	5	6	6	8	6.85
X14	7	7	8	9	9	7	8	9	8	8.25
X15	8	8	6	9	8	7	6	7	7	7.10
X16	6	6	6	6	7	6	5	5	6	5.68

注:表中权值条件是振幅为0.061 0、波阻抗为0.061 0、声波为0.051 2、电阻率为0.088 6、孔隙度为0.149 3、渗透率为0.030 5、构造位置为0.301 3、河道宽度为0.165 8、砂体厚度为0.091 3。

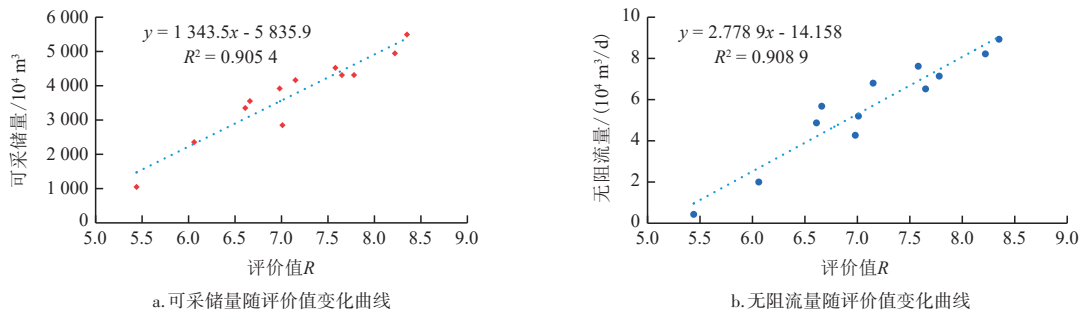


图4 可采储量和无阻流量随评价价值变化曲线

Fig. 4 Variation curves of recoverable reserves and open flow rate change with evaluation values

个参数上,因此,绘制这两项参数随评价价值变化的曲线(图4)。

选取X1—X12井计算的评价价值绘制与可采储量和无阻流量的关系曲线,从图4可以看出:评价价值与可采储量、无阻流量呈现很好的一致性,整体趋势为评价价值越大可采储量和无阻流量越高,气井建产效果越好,证明了方法和结果的准确可靠,依据此方法可以系统评价产能建设区的建产效果,指导目标优选及井位部署,即优先选择评价价值较高区域。计算出各影响因素的权重后,通过对比分析得出储层评价结果:差储层评价价值 $R < 6$,较差储层评价价值 R 介于 $[6, 7)$,一般储层评价价值 R 介于 $[7, 8)$,优质储层评价价值 $R \geq 8$ 。

利用X13—X16井对计算结果进行验证分析,评价结果与无阻流量和可采储量存在较强的相关性,即评价结果为差储层的井建产效果相对最差,评价结果为优质储层的井建产效果相对最好,说明针对蓬莱镇组气藏建立的储层分类方法比较可靠(表3)。

5 结论

1) 采用层次分析法建立的致密砂岩储层评价模型,克服了储层评价考虑因素繁杂、参数类别不一致等问题,很好地实现了储层的分类评价,明确了影响储层品质的主控因素,具有一定应用价值。

2) 产能建设效果证实利用此方法建立的新场气田蓬莱镇组气藏储层定量评价模型方法比较可靠,明确了该气藏构造位置、河道宽度、孔隙度为储

表3 储层分类评价结果验证分析

Table 3 Validation analysis of reservoir classification evaluation results

井号	评价价值R	评价结果	可采储量/ 10^4 m^3	无阻流量/ $(10^4 \text{ m}^3/\text{d})$
X13	6.85	较差储层	292.9	3.98
X14	8.25	优质储层	555.2	9.80
X15	7.10	一般储层	355.6	6.35
X16	5.28	差储层	206.6	2.10

层评价的主控因素,且可以利用储层评价结果将储层划分为差储层、较差储层、一般储层、优质储层4类。

3) 对于致密河道砂岩气藏,基于层次分析法建立储层评价模型的方法可以很好地认识气藏,实现储层的定量综合评价,方法具有一定推广性,下步可结合人工智能,通过机器学习进一步开展更加复杂、精确的储层定量分类评价研究。

参考文献

- [1] 张广权,胡向阳,陈舒薇.致密低渗砂岩储层定量评价方法[J].天然气地球科学,2016,27(12):2147-2153.
ZHANG Guangquan, HU Xiangyang, CHEN Shuwei. Quantitative evaluation method of tight sandstone reservoir with low permeability[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(12): 2147-2153.
- [2] 王文涛,刘鹏超,李标,等.特低渗储层产能模糊综合评价方法研究[J].特种油气藏,2019,26(2):127-131.
WANG Wentao, LIU Pengchao, LI Biao, et al. Fuzzy comprehensive evaluation for productivity of ultra-low permeability reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 127-131.

- [3] 涂乙,邹海燕,孟海平,等.页岩气评价标准及储层分类[J].石油与天然气地质,2014,35(1):153-158.
TU Yi, ZOU Haiyan, MENG Haiping, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 153-158.
- [4] 宋明水,刘振,张学才,等.基于改进层次熵分析法的致密砂岩储层可压性评价——以准噶尔盆地Z109井侏罗系储层为例[J].地质力学学报,2019,25(4):509-517.
SONG Mingshui, LIU Zhen, ZHANG Xuecai, et al. Fractability evaluation of tight sandstone reservoirs based on improved entropy analytic hierarchy process: Taking the Jurassic reservoirs of well Z109 in the Juggar basin as an example[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(4): 509-517.
- [5] 施龙青,滕超,韩进,等.基于层次分析法-系统聚类分析的井田构造复杂程度评价[J].中国科技论文,2015,10(21):2550-2554.
SHI Longqing, TENG Chao, HAN Jin, et al. Evaluation of mine field structure complexity based on analytical hierarchy process and hierarchical cluster analysis[J]. China Sciencepaper, 2015, 10(21): 2550-2554.
- [6] 陈欢庆,丁超,杜宜静,等.储层评价研究进展[J].地质科技情报,2015,34(5):66-74.
CHEN Huanqing, DING Chao, DU Yijing, et al. Advances of reservoir evaluation researches[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(5): 66-74.
- [7] 张仲宏,杨正明,刘先贵,等.低渗透油藏储层分级评价方法及应用[J].石油学报,2012,33(3):437-441.
ZHANG Zhonghong, YANG Zhengming, LIU Xiangui, et al. A grading evaluation method for low-permeability reservoirs and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 437-441.
- [8] 周桦,魏力民,王同,等.威荣深层页岩气储层精细评价方法及应用[J].油气藏评价与开发,2021,11(2):176-183.
ZHOU Hua, WEI Limin, WANG Tong, et al. Evaluation method of Weirong deep shale gas reservoir and its application[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(2): 176-183.
- [9] 武恒志,叶泰然,赵迪,等.川西坳陷陆相致密气藏河道砂岩储层精细刻画技术及其应用[J].石油与天然气地质,2015,36(2):230-239.
WU Hengzhi, YE Tairan, ZHAO Di, et al. Fine characterization technique and its application to channel sandstone in continental tight gas reservoirs of western Sichuan Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 230-239.
- [10] 黎华继,严焕榕,詹泽东,等.川西坳陷侏罗系致密砂岩气藏储层精细评价[J].天然气工业,2019,39(增刊1):129-135.
LI Huaji, YAN Huanrong, ZHAN Zedong, et al. Fine reservoir evaluation of Jurassic tight sandstone gas reservoir in western Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(suppl. 1): 129-135.
- [11] 郭彤楼.川西侏罗系致密砂岩气藏稳产关键技术与展望[J].西南石油大学学报(自然科学版),2022,44(3):1-11.
GUO Tonglou. Key technologies and prospects of stable production of Jurassic tight sandstone gas reservoirs in western Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2022, 44(3): 1-11.
- [12] 周锋,王勇飞,李晓明,等.川西侏罗系致密气藏开采中后期高效开发地质技术[J].天然气与石油,2023,41(1):75-81.
ZHOU Feng, WANG Yongfei, LI Xiaoming, et al. Geological techniques for efficient development of West Sichuan Jurassic tight gas reservoir in mid-late production stage[J]. Oil & Gas Exploration and Development, 2023, 41(1): 75-81.
- [13] 徐文军,张莎莎,吴财芳,等.基于层次分析法的煤储层构造复杂程度定量评价[J].河南理工大学学报(自然科学版),2019,38(2):20-26.
XU Wenjun, ZHANG Shasha, WU Caifang, et al. Quantitative assessment of structure complexity of coal reservoir based on analytical hierarchy process[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2019, 38(2): 20-26.
- [14] 邓雪,李家铭,曾浩健,等.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,2012,24(7):93-100.
DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP weight vector and its applications [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 24(7): 93-100.
- [15] 张小东,张硕,孙庆宇,等.基于AHP和模糊数学评价地质构造对煤层气产能的影响[J].煤炭学报,2017,42(9):2385-2392.
ZHANG Xiaodong, ZHANG Shuo, SUN Qingyu, et al. Evaluating the influence of geological structure to CBM productivity based on AHP and fuzzy mathematics[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2385-2392.
- [16] 马云东,胡明东.改进的AHP法及其在多目标决策中的应用[J].系统工程理论与实践,1997,17(6):41-45.
MA Yundong, HU Mingdong. Improves analysis of hierarchy process and its application to multiobjective decision[J]. System Engineering Theory and Practice, 1997, 17(6): 41-45.
- [17] 张旭,颜其彬,李祖兵.陆相碎屑岩储层定量评价的新方法——以河南某油田为例[J].天然气地球科学,2007,18(1):141-148.
ZHANG Xu, YAN Qibing, LI Zhubing. Quantitative assessment of reservoirs in super-highly watered cut oil fields[J]. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(1): 141-148.
- [18] 米伟伟,谢小飞,曹红霞,等.鄂尔多斯盆地东南部二叠系山2—盒8段致密砂岩储层特征及主控因素[J].岩性油气藏,2022,34(6):101-117.
MI Weiwei, XIE Xiaofei, CAO Hongxia, et al. Characteristics and main controlling factors of tight sandstone reservoirs of Permian Shan 2 to He 8 members in southeastern Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(6): 101-117.
- [19] 王永骁,付斯一,张成弓,等.鄂尔多斯盆地东部山西组2段致密砂岩储层特征[J].岩性油气藏,2021,33(6):12-20.
WANG Yongxiao, FU Siyi, ZHANG Chenggong, et al. Characteristics of tight sandstone reservoirs of the second member of Shanxi Formation in eastern Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(6): 12-20.
- [20] 胡昌蓬,徐大喜.页岩气储层评价因素研究[J].天然气与石油,2012,30(5):38-42.

- HE Dongbo, JI Guang, JIANG Qianfeng, et al. Differential development technological measures for high-water-cut tight sandstone gas reservoirs in western area of Sulige Gas Field[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(1): 73-82.
- [19] 王军磊, 贾爱林, 位云生, 等. 基于多井模型的压裂参数-开发井距系统优化[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(5): 981-992. WANG Junlei, JIA Ailin, WEI Yunsheng, et al. Optimization workflow for stimulation-well spacing design in a multiwell pad[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(5): 981-992.
- [20] 郭智, 贾爱林, 冀光, 等. 致密砂岩气田储量分类及井网加密调整方法——以苏里格气田为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(11): 1299-1309. GUO Zhi, JIA Ailin, JI Guang, et al. Reserve classification and well pattern infilling method of tight sandstone gasfield: A case study of Sulige gasfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(11): 1299-1309.
- [21] 杨震, 孔令峰, 杜敏, 等. 国内致密砂岩气开发项目经济评价和财税扶持政策研究[J]. *天然气工业*, 2016, 36(7): 98-109. YANG Zhen, KONG Lingfeng, DU Min, et al. Economic evaluation on tight sandstone gas development projects in China and recommendation on fiscal and taxation support policies[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(7): 98-109.
- [22] 朝华. 国家发展改革委、住房城乡建设部关于调整部分行业建设项目财务基准收益率的通知[J]. *化学工业*, 2014, 32(4): 53-54. CHAO Hua. Notice on financial discount rate adjustment of some industry sectors' construction projects by the National Development and Reform Commission and the Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China[J]. *Chemical Industry*, 2014, 32(4): 53-54.
- [23] 刘传喜, 姚合法, 严谨. 低渗岩性气藏开发选区评价方法研究[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(5): 697-702. LIU Chuanxi, YAO Hefa, YAN Jin. Research on the selection and evaluation of development blocks in lithologic gas reservoirs with low-permeability[J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(5): 697-702.
- [24] CHENG M H, XUE W, ZHAO M, et al. Production data analysis and practical applications in the Sulige tight gas reservoir, Ordos Basin, China[J]. *Geofluid*, 2021, (3): 5549725.
- [25] 吴正, 江乾锋, 周游, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格致密砂岩气田提高采收率关键技术及攻关方向[J]. *天然气工业*, 2023, 43(6): 66-75. WU Zheng, JIANG Qianfeng, ZHOU You, et al. Key technologies and orientation of EGR for the Sulige tight sandstone gas field in the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(6): 66-75.
- (编辑 郭群)

(上接第 474 页)

- HU Changpeng, XU Daxi. Study on shale reservoir evaluation factors[J]. *Natural Gas and Oil*, 2012, 30(5): 38-42.
- [21] 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 of reservoir in low-permeability oilfields[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2006, 27(2): 64-67.
- [22] 吴育平, 孙卫, 魏驰, 等. 基于聚类分析和灰色关联分析法的储层综合评价——以鄂尔多斯盆地姬塬地区长61储层为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2018, 8(1): 12-15. WU Yuping, SUN Wei, WEI Chi, et al. Reservoir comprehensive evaluation based on cluster analysis and gray correlative analytical method: A case study in Chang-61 formation of Ji Yuan area in Ordos Basin[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2018, 8(1): 12-15.
- [23] 陆亚秋, 王进, 曹梦茜. 基于改进的层次分析法的页岩气开发选区评价方法[J]. *油气藏评价与开发*, 2021, 11(2): 204-211. LU Yaqiu, WANG Jin, CAO Mengxi. Evaluation method of shale gas development area selection based on improved analytic hierarchy process[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2021, 11(2): 204-211.
- [24] 匡立春, 侯连华, 杨智, 等. 陆相页岩油储层评价关键参数及方法[J]. *石油学报*, 2021, 42(1): 1-14. KUANG Lichun, HOU Lianhua, YANG Zhi, et al. Key parameters and methods of lacustrine shale oil reservoir characterization[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(1): 1-14.
- [25] 王勇, 鲍志东, 刘虎. 低孔低渗储层评价中数学方法的应用研究[J]. *西南石油大学学报*, 2007, 29(5): 8-12. WANG Yong, BAO Zhidong, LIU Hu. Application of mathematics methods in reservoir evaluation of low porosity and low permeability[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(5): 8-12.
- [26] 杨正明, 姜汉桥, 朱光亚, 等. 低渗透含水气藏储层评价参数研究[J]. *石油学报*, 2008, 29(2): 252-255. YANG Zhengming, JIANG Hanqiao, ZHU Guangya, et al. Research on reservoir evaluation index for low-permeability water-bearing gas reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(2): 252-255.
- (编辑 余聪)