

引用格式:王书黎,王锦国,张承森,等.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[J].油气藏评价与开发,2025,15(3):434-442.

WANG Shuli, WANG Jinguo, ZHANG Chengsen, et al. Study on well logging reservoir fluid evaluation method based on 2D cloud model: A case study of Kuqa Depression, Tarim Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(3): 434-442.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.03.010

# 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

王书黎<sup>1</sup>, 王锦国<sup>1</sup>, 张承森<sup>2</sup>, 张喆安<sup>3</sup>, 帕尔哈提·凯山<sup>4</sup>, 刘龙成<sup>3</sup>

(1.河海大学地球科学与工程学院,江苏南京 211100;2.中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院,新疆库车 841000;3.核工业北京化工冶金研究院,北京 101149;4.新疆职业大学,新疆乌鲁木齐 830013)

**摘要:**在油气勘探中,测井资料的准确解释对储层流体性质评价至关重要。传统测井方法依赖测井岩石物理模型,通过建立孔隙度、渗透率、含油气饱和度等参数与地层流体性质的关系,实现储层分类。然而,由于储层地质条件复杂,测井数据常存在异常点、多因素耦合、流体界限模糊等问题,导致传统方法在复杂储层环境下的适应性受限,解释结果存在不确定性。为提高储层流体评价精度,在传统测井评价方法基础上引入云模型理论,提出基于二维云模型的储层流体评价方法。该方法选取孔隙度和含气饱和度2个关键测井参数,利用云模型处理测井数据的模糊性与随机性,构建储层流体分类的数学模型。首先,基于云模型理论,推导适用于测井评价的二维云模型,明确各数学参数(期望值、熵、超熵)的地质物理意义,并利用云发生器生成储层二维云图。随后,通过相似度分析技术,对储层类型进行定量分类,提高解释的准确性。为验证方法的有效性,选取塔里木盆地库车坳陷的测井数据进行应用分析,并对比传统方法、云模型评价结果和试油试气结果。研究表明:该方法在复杂储层中能够准确刻画储层流体特征。相较于传统方法,二维云模型不仅提供储层类型的定性判断,还能量化流体性质的不确定性,提高评价结果的稳定性和可靠性。基于二维云模型的储层流体评价方法能有效反映储层流体特性,在复杂储层环境下具备较强适应性。最终评价结果与试油试气结果高度一致,证明该方法的可行性和有效性。该方法可作为传统测井解释的有力补充,为提高测井数据解释精度、优化复杂储层流体性质识别提供新思路。

**关键词:**库车坳陷;二维云模型;评价标准;测井评价;模糊性

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## Study on well logging reservoir fluid evaluation method based on 2D cloud model: A case study of Kuqa Depression, Tarim Basin

WANG Shuli<sup>1</sup>, WANG Jinguo<sup>1</sup>, ZHANG Chengsen<sup>2</sup>, ZHANG Zhean<sup>3</sup>, PARHAT Kaysar<sup>4</sup>, LIU Longcheng<sup>3</sup>

(1. School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and development, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China; 3. Beijing Research Institute of Chemical Engineering and Metallurgy, Beijing 101149, China; 4. Xinjiang Vocational University, Urumqi, Xinjiang 830013, China)

**Abstract:** Accurate interpretation of well logging data is crucial for the evaluation of reservoir fluid properties in oil and gas exploration. Conventional well logging methods rely on petrophysical models that correlate parameters such as porosity, permeability, and oil and gas saturation with reservoir fluid properties to achieve reservoir classification. However, complex geological conditions often lead to issues such as anomalies, multi-factor coupling, and ambiguous fluid boundaries in well logging data. These challenges limit the adaptability of conventional methods and bring uncertainties in interpretation results. To improve the accuracy of reservoir fluid evaluation, this study incorporated cloud model theory into conventional well logging evaluation and proposed an evaluation method for reservoir fluid based on a 2D cloud model. The method selected porosity and gas saturation as key logging parameters and utilized cloud models to process the fuzziness and randomness in well logging data, thereby establishing a mathematical model for reservoir fluid classification. First, a 2D cloud model for well logging evaluation was derived based on cloud model theory, with clarified geophysical significance assigned to its mathematical parameters (expectation, entropy, and hyper-entropy). 2D cloud diagrams of the reservoir were generated using a cloud generator. Subsequently, similarity analysis was applied to quantitatively classify reservoir types, enhancing interpretation accuracy. To

收稿日期:2024-09-11。

第一作者简介:王书黎(1998—),男,在读博士研究生,主要从事地下流体识别与评价工作。地址:江苏省南京市江宁区佛城西路8号,邮政编码:211100。E-mail:230209020003@hhu.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目子课题“DNAPLs多介质界面迁移转化原位表征与精细刻画技术”(2023YFC3706001)。

validate the effectiveness of this method, well logging data from the Kuqa Depression in the Tarim Basin were used for application analysis, with results compared with those obtained from conventional methods, cloud model evaluation, and well testing. The results showed that the proposed method accurately characterized reservoir fluid properties in complex reservoirs. Compared with conventional methods, the 2D cloud model not only provided qualitative classification of reservoir types but also quantified uncertainties in fluid properties, thus improving the stability and reliability of evaluation results. The findings indicate that the reservoir fluid evaluation method based on 2D cloud model effectively reflects reservoir fluid characteristics and exhibits strong adaptability in complex reservoir environments. The final evaluation results demonstrate strong consistency with well testing results, verifying the method's feasibility and effectiveness. As a valuable supplement to conventional well logging interpretation, this method provides a new approach for improving the accuracy of well logging data interpretation and optimizing fluid property identification in complex reservoirs.

**Keywords:** Kuche Sag; 2D cloud model; evaluation criteria; well logging evaluation; fuzziness

近年来,受国际局势变化影响,世界原油价格变化剧烈,国内能源供应面临巨大挑战。中国是能源使用大国,随着中国经济的快速发展,国内对石油需求快速增长,石油对外依存度逐年升高<sup>[1]</sup>。塔里木盆地是近几年中国油气资源增储上产的关键区域,随着勘探开发的不断深入,该地区油气勘探面临储层构造规模小、埋藏深、数据复杂、储层解释困难等问题,且储层地质条件复杂,勘探开采成本高。因此,如何在控制生产成本的同时提高储层解释的准确性,是当前测井评价工作的重点<sup>[2-5]</sup>。

储层评价主要解决以下问题:确定储层下限,划分储集层与非储集层,对储层进行分类评价<sup>[6]</sup>。目前的测井解释工作中,主要使用交会图法,即通过最小二乘法获得储层下限,并依此进行储层划分。每个数据点对最终结果都具有同等影响力,而在测井数据采集和岩心分析过程中难免存在异常点,致使最终的评价标准不合理<sup>[7]</sup>,且单因素的最小二乘法未考虑储层评价工作中各个标准之间的互相联系以及评价标准本身的模糊性。因此,在传统的测井储层评价方法基础上,引入了云模型,对传统测井方法进行补充。其最早由李德毅院士提出,并拓展到二维层面<sup>[8-9]</sup>,该模型能够显示评价指标的模糊性与随机性,是一种不确定性人工智能方法<sup>[10]</sup>。从数学上看,云模型由模糊数学发展而来,适用于各类参数评价工作。经过多年发展,该方法已在水资源评价、生态风险评价、城市管理等众多领域进行过试验性应用,取得了良好的应用效果<sup>[11-14]</sup>。在地质评价方面,张亚光等<sup>[15]</sup>将其应用于地层划分;丁恺等<sup>[16]</sup>利用云模型进行地层分析。相比于其他行业,云模型在地质领域目前的应用较少,有广阔的应用前景值得探究。

根据测井数据的特性推导了适用于测井评价的云模型,分析了云模型中各参数在测井评价中的意义。以孔隙度与含油气饱和度为主要评价因素,利用云发生器构建了适用于塔里木盆地库车坳陷的测井储层评价二维云模型。使用二维云模型法对研究区的测井数据进行解释,并分析了最终评价结果的合理性和有效性。

## 1 云模型概念及生成

在现代信息处理和数据分析领域,如何将定量与定性数据相结合是一个核心挑战<sup>[17]</sup>。云模型作为一种融合不确定性和模糊性的工具,提供了一个有效的解决方案。研究详细探讨云模型理论的基本概念及其在实际应用中的具体实现,并通过一维和二维云模型生成的实例,展示其在评价标准中的应用。

### 1.1 云模型理论

设  $U$  为精确数组组成的集合,各定量数据  $u \in U$ ,  $u$  在  $T$  (定性概念) 范围内随机出现,则每个  $u$  对  $T$  的对应符合某种趋势  $\mu \in [0, 1]$ ,  $\mu$  为隶属度。这种情况下  $u$  的分布称为云,单个数对  $(u, \mu)$  称为云滴<sup>[8]</sup>。

具体的云模型是由  $n$  个  $u$  组成的数组的数学期望、 $E_u$  ( $u$  的熵)、 $H_e(u)$  ( $u$  的超熵) 及其分布情况确定,若云滴分布满足正态分布,则称为正态云模型。此时  $u$  对  $T$  的隶属度为:

$$\mu = \exp \left[ -\frac{(u - E_u)^2}{2(E'_u)^2} \right] \quad (1)$$

式中:  $E_u$  为  $u$  的期望值;  $E'_u$  为以  $u$  的  $E_u$  为期望  $H_e$  为标准差的正态随机数;  $n$  为  $u$  的数目。  $E_u$ 、 $E'_u$ 、 $H_e$  这 3 个数可以利用逆向云发生器在 MATLAB 中得到<sup>[18]</sup>。

对于具有多个等级的评价标准,将评价标准及待评价数据代入云模型中生成云图,可以直观判断待评价数据最接近的评价标准。若要进行定量评价,则需通过式(2)进行相似度检验<sup>[19]</sup>:

$$\lambda_j = \exp \left[ -\frac{(E_u - E_{uj})^2}{2(E'_{uj})^2} \right] \quad (2)$$

式中:  $\lambda_j$  为待评价数据云模型与第  $j$  个评价标准云模型的相似度;  $E_{uj}$  为第  $j$  个评价标准的期望值;  $E'_{uj}$  为第  $j$  个评价标准的熵。按照式(2)计算与各评价标准云模型的相似度,依据最大隶属度原则,最大相似度对应的评价标准为最终评价结果。

## 1.2 云模型生成

### 1.2.1 一维云模型生成

一维云模型是最基本的云模型,在此基础上变化产生不同应用场景的云模型,是其他云模型的基础。

对于  $n$  个随机分布的一维离散数据(云滴),若要生成一维云模型,需先通过逆向云发生器获取云模型的3个数字特征( $E_u, E_n, H_e$ ),过程见图1。



图1 一维逆向云发生器

Fig. 1 1D reverse inverse cloud generator

根据数据情况不同,逆向云发生器需采用不同的算法<sup>[20]</sup>。以数字特征(0, 2, 0.15)为例,将数字特征代入正向云发生器,可绘制出一维云模型云图(图2)。

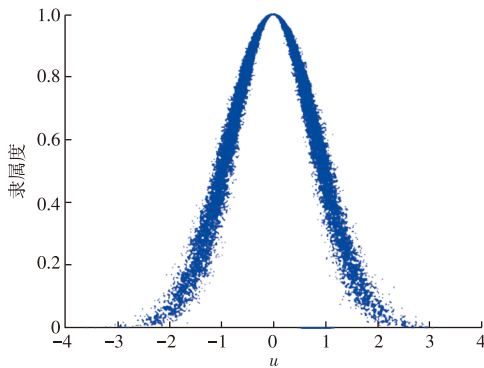


图2 一维云模型云图

Fig. 2 Cloud diagram of 1D cloud model

图2中,云滴最为密集处体现 $E_u$ ,即图2中( $u=0, \mu=1$ )处,越接近 $E_u$ 的点隶属度越大;图形向两侧延伸的程度体现 $E_n$ ,即云滴的随机性;云图的厚度体现 $H_e$ ,对于评价标准云模型而言,表现了评价标准的模糊性。

### 1.2.2 二维云模型生成

对于由2个参数 $x, y$ 描述的 $T$ ,则需使用二维云模型生成云图<sup>[9]</sup>,隶属度计算公式如下:

$$\mu = \exp \left\{ - \left[ \frac{(x - E_x)^2}{2(E'_{nx})^2} + \frac{(y - E_y)^2}{2(E'_{ny})^2} \right] \right\} \quad (3)$$

式中: $E_x, E_y$ 分别为参数 $x, y$ 的期望值; $E'_{nx}, E'_{ny}$ 分别为以 $x, y$ 的熵 $E_{nx}, E_{ny}$ 为期望值, $x, y$ 的超熵 $H_{ex}, H_{ey}$ 为标准差的正态随机数。

由式(2)可知,要构建二维云模型,需要6个数字特征( $E_x, E_{nx}, H_{ex}, E_y, E_{ny}, H_{ey}$ )。与一维云模型相同,首先,

将云滴数据输入逆向云发生器获得数字特征;其次,将数字特征输入正向云发生器;最后,通过MATLAB的绘图功能输出二维云模型云图(图3)。

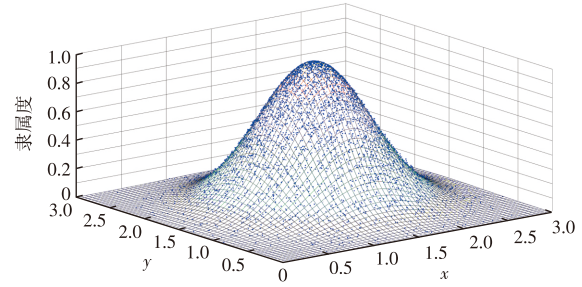


图3 二维云模型云图

Fig. 3 Cloud diagram of 2D cloud model

图3与一维云模型相似,图3中对称轴投影点对应的 $x, y$ 值体现期望值 $E_x, E_y$ ,且越接近该点隶属度越大。图形向两侧延伸的程度体现二维云模型的总熵,云图的厚度体现二维云模型的总超熵,对于评价标准云模型而言,表现了评价标准的模糊性。显然,二维云图在垂直于 $X, Y$ 轴上的投影边界分别对应 $y, x$ 的一维云图。二维云模型的相似度计算公式如下:

$$\lambda_j = \exp \left\{ - \left[ \frac{(E_x - E_{xj})^2}{2(E_{nxj})^2} + \frac{(E_y - E_{yj})^2}{2(E_{nyj})^2} \right] \right\} \quad (4)$$

式中: $E_{xj}, E_{yj}$ 分别为 $x, y$ 对应第 $j$ 个评价标准的期望值; $E_{nxj}, E_{nyj}$ 分别为 $x, y$ 对应第 $j$ 个评价标准的熵。

从式(4)中可以看出,二维云模型既能通过云图直观反映数据的随机性及评价指标的模糊性,又能通过相似度检验得出对应的评价,满足测井储层评价工作的要求。

## 2 测井储层评价云模型构建

储层的流体性质并非截然分明,某些层段可能同时表现为气层和水层的混合状态(如含气水层),这是传统解释方法难以精准表达的部分。测井数据通常受到采集条件、地质结构等影响,带有一定程度的不确定性。孔隙度是储层储集能力的关键指标,但它受地质条件(如沉积环境、成岩作用等)影响,可能在一定范围内波动。云模型通过熵捕捉这些波动性,并通过相似度判断是否接近某种储层类型。含油气饱和度直接决定储层是否含有油气,但在某些过渡层段(如含气水层)可能出现模糊性,云模型可以通过相似度计算量化这种过渡性质。因此,利用云模型可以将测井数据与储层属性的定量和定性特征相结合,有效提高储层评价的精度。通过构建二维云模型,结合常规评价标准,对储层的孔隙度和含气饱和度进行分析,并对储层的气层、水层等属性进行分类和评价,

以期对测井储层解释提供更具指导意义的依据。

## 2.1 研究区常规评价标准

测井储层评价主要考虑孔隙度、渗透率、含油气饱和度等因素。要构建储层评价标准云模型,需要先获得常规测井解释标准。研究区目前已有探明气藏,对孔隙度、含油气饱和度下限做了大量研究,同时采用了试油资料约束法,并借鉴四川邛西气田和相近气田比较来确定孔隙度下限、含气饱和度下限(表1)。

表1 库车坳陷克深区带不同方法确定孔隙度、含气饱和度下限统计

Table 1 Statistics of lower limits of porosity and gas saturation determined by different methods in Keshen area, Kuqa Depression

| 方法       | 孔隙度下限/% | 含气饱和度下限/% |
|----------|---------|-----------|
| 相近气田比较   | 4.0     | 50        |
| 试油资料约束法  | 4.0~4.3 | 50        |
| 借鉴四川邛西气田 | 3.5     |           |
| 综合取值     | 4.0     | 50        |

本研究的常规评价参数直接利用已探明区块确定,并通过对孔隙度下限与含气饱和度下限进行敏感性分析以检测其合理性。

### 2.1.1 孔隙度下限敏感性分析

气层有效厚度下限中有4个主要条件,固定其中3个条件不变,改变1个条件,检查对有效厚度的影响,称为敏感性检测<sup>[21]</sup>。

图4是孔隙度敏感性检测,从图4中可以看出孔隙度截止值为4.0%,正好交于曲线变化的拐点,拐点左侧厚度基本不受下限值变化的影响,表明选择的截止值是合理的。从孔隙度敏感性检测分析中可以看出,孔隙度为4.0%以下基本上都是在图版曲线变化相对较平缓的地

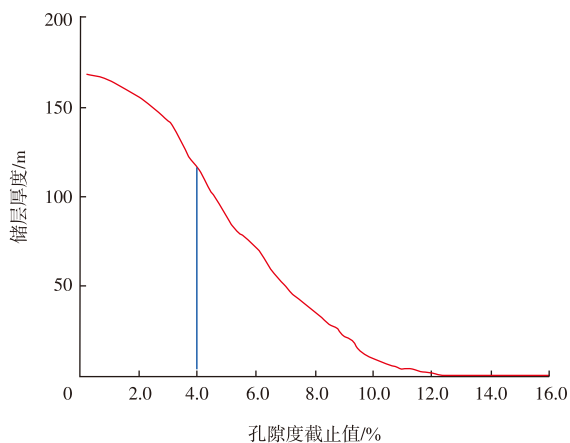


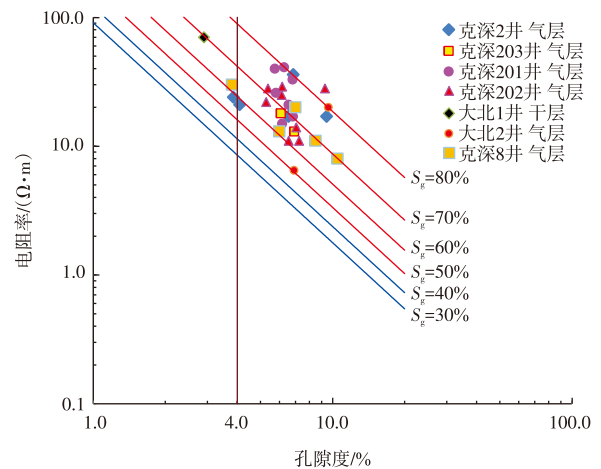
图4 孔隙度敏感性检测

Fig. 4 Porosity sensitivity test

方,由于研究区基质孔隙度普遍较低,孔隙度为4.0%以上的变化比较敏感。

### 2.1.2 含气饱和度下限敏感性分析

根据库车坳陷克深区带A井区试油资料得到孔隙度与电阻率交汇图(图5)可知,A井区的产气层段均在50%的含气饱和度线之上,即含气饱和度下限为50%。



注:  $S_g$  为含气饱和度, %。

图5 库车坳陷克深区带A井区测试井段孔隙度与电阻率交会图

Fig. 5 Crossplot of porosity and resistivity for test intervals in well A, Keshen area, Kuqa Depression

为了计算云模型数字特征,通过多项式回归结合原始数据补齐所有定量边界后,得到的库车坳陷克深区带A井区碎屑岩常规测井储层解释评价标准见表2。

表2 库车坳陷克深区带A井区常规测井储层解释评价标准  
Table 2 Conventional well logging interpretation and evaluation criteria for reservoirs in well A, Keshen area, Kuqa Depression

| 类型   | 孔隙度/%   | 含气饱和度/% |
|------|---------|---------|
| 差气层  | 4.0~6.0 | 58~68   |
| 水层   | 6.0~8.0 | 20~30   |
| 含气水层 | 6.0~8.0 | 30~40   |
| 气水同层 | 6.0~8.0 | 40~50   |
| 气层   | 6.0~8.0 | 50~60   |

## 2.2 研究区二维云模型评价标准

除干层外,测井解释评价标准一般划分为5个等级,将A井区评价标准和实测数据带入到二维云发生器中,可求得各等级的数字特征( $E_x, E_{mx}, H_{ex}, E_y, E_{ny}, H_{ey}$ )(表3)。其中,期望值对应孔隙度和含气饱和度的中心值,反映地层的平均性质;熵反映数据的离散程度,可表示储层性质的随机性和不确定性;超熵表示熵的波动性,反映储层性

表3 库车坳陷克深区带A井区储层评价二维云模型

Table 3 2D cloud model for reservoir evaluation in well A, Keshen area, Kuqa Depression

| 类型   | 二维云模型数字特征                       |
|------|---------------------------------|
| 差气层  | (5, 0.50, 0.19, 63, 1.67, 0.10) |
| 水层   | (7, 0.98, 0.59, 25, 2.10, 0.30) |
| 含气水层 | (7, 0.98, 0.59, 35, 2.10, 0.30) |
| 气水同层 | (7, 0.98, 0.59, 45, 2.10, 0.30) |
| 气层   | (7, 0.98, 0.59, 55, 2.10, 0.30) |

质变化的复杂程度。

在计算时还需对数据进行归一化处理以及确定评价指标的权重。归一化处理公式如下:

$$x'_i = (x_i - x_{i,\min}) / (x_{i,\max} - x_{i,\min}) \quad (5)$$

式中:  $x'_i$  为归一化后的数据;  $x_i$  为第  $i$  个标准下观测数据的值;  $x_{i,\min}$ 、 $x_{i,\max}$  分别为第  $i$  个标准下数据值  $x_i$  的最小值和最大值。

采用熵权法确定权重,公式如下:

$$\begin{cases} H_i = - \sum_{k=1}^l p_k \ln p_k \\ H'_i = \frac{H_i}{\ln n} \\ \omega_i = \frac{1 - H'_i}{m - \sum_{i=1}^m H'_i} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $H_i$  为第  $i$  个标准下观测数据的熵值;  $l$  为评价标准个数;  $p_k$  为各评价标准在各等级出现的频率;  $H'_i$  为归一化后的熵值;  $\omega_i$  为熵权法下各评价标准的权重;  $m$  为等级数。

在实际应用中,当孔隙度与含油气饱和度位于差气层下界且与差气层相似度很低时,应当解释为干层;当孔隙度与含油气饱和度很高时,显然应解释为油气层,但此时的相似度却很低。因为对于没有最大边界值的区间,评价标准是单一的,不是对称的<sup>[13]</sup>。因此,在实际计算时,应当采用半云模型,即靠近其他评价标准的一侧使用云模型判断,超过给定边界值后,相似度恒为1。边界值取期望值,即相似度最大处。

将表3中数据输入正向云发生器,获得各评价等级的云图。将A井某层位数据生成云模型进行比较,该层位平均孔隙度6.4%,平均含气饱和度67%,常规解释结果为气层,生成云图见图6。

从图6可以看出,该层位云图形状和位置最接近气层的标准云图,若要进行定量分析,还需带入式(4)计算与各评价标准的相似度,计算结果见表4。

显然,该层位与气层的标准云图相似度最高。因此,根据最大隶属度原则,该层位的云模型评价结果为气层,与常规评价结果一致。

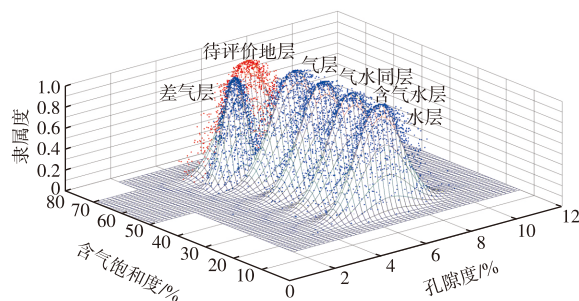


图6 二维云模型评价标准对比

Fig. 6 Comparison of evaluation criteria for 2D cloud models

表4 待评价层位与各评价标准相似度

Table 4 Similarity between target reservoirs and each evaluation criterion

| 类型   | 相似度   |
|------|-------|
| 差气层  | 0.018 |
| 水层   | 0.112 |
| 含气水层 | 0.259 |
| 气水同层 | 0.478 |
| 气层   | 0.703 |

### 3 应用实例

库车坳陷位于塔里木盆地北部克拉苏构造带,该构造带分为克拉区带和克深区带,克深区带东西向可分为4段:阿瓦特段、博孜段、大北段和克深段。克深区带受北部的克拉苏断裂和南部的拜城断裂控制,2条边界断裂之间发育多条次级逆冲断裂<sup>[22-24]</sup>。塔里木盆地在地质历史中,经历了复杂的成岩作用,形成致密砂岩为主要岩性的目的层<sup>[25-26]</sup>。以克深区带A井为例,对该井各层位进行二维云模型评价。该井段共划分层位54层,常规测井解释结果可以将其分为:干层16层,气层14层,差气层24层;钻井取心2次,井段6 178~6 186 m和6 181.1~6 189.1 m,该井段储集层厚度为6.24 m,非储集层厚度为1.76 m,岩心不含油气;试油井段6 140~6 270 m,试油结果为高产气层。全井段常规测井解释结果见图7。

运用表3中的测井评价二维云模型进行储层评价,将各储层层位的云模型计算结果带入式(4)中计算相似度,根据相似度得出利用二维云模型的测井储层评价结果,常规解释结果与云模型解释结果对比见表5。

从表5中可以看出,利用二维云模型法可以准确有效地完成各储层层位的解释评价工作。使用2种解释方法得到的解释结果基本一致,说明通过云模型得出的评价结果符合地质规律。且二维云模型法能够得

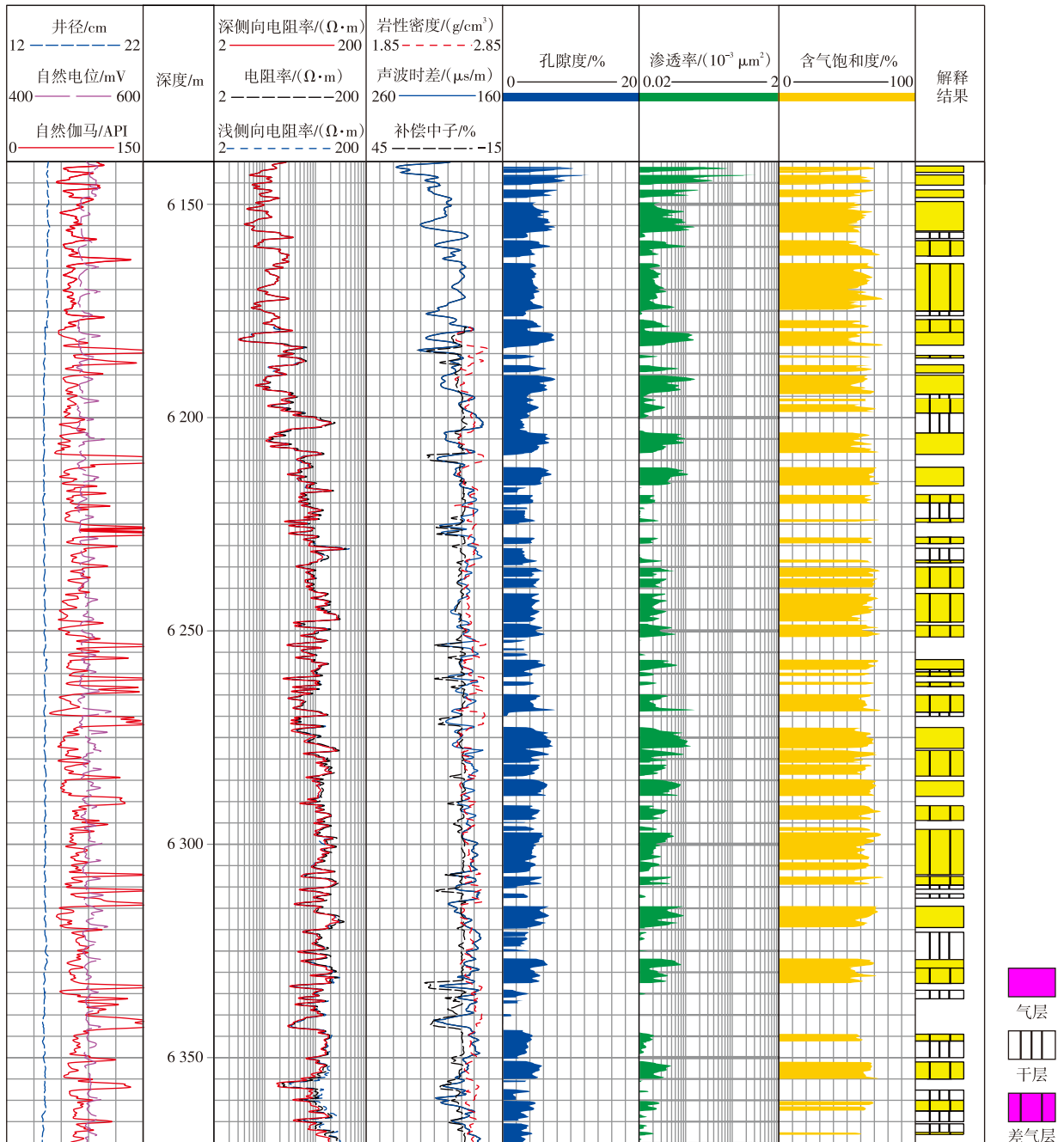


图7 库车坳陷克深区带A井全井段常规测井解释

Fig. 7 Conventional well logging interpretation of entire intervals in well A, Keshen area, Kuqa Depression

到层位对应解释结果的相似度,相似度包含比文字描述更多的信息。例如,第38层和第39层都为差气层,但第39层对应的差气层相似度(0.830)远高于第38层的差气层相似度(0.371),这表明第39层为差气层的可能性大于第38层(图8)。从2层的测井曲线及平均孔隙度、含气饱和度可以看出,第39层的物性更接近差气层的评价标准。

具体分析解释结果有差异的第27层、第49层位,都是将解释结果从差气层转变为气层(图9—图10)。对比测井曲线上相邻层位的气层,差异层的物性与相邻气层

相似;从平均孔隙度、含气饱和度上看,两层位的孔隙度虽然略低于常规测井解释划定的气层下限,但都具有较高的含气饱和度,因此得到的评价结果与常规解释不同,这也与实际测井评价工作中的解释经验相符。

钻井取心的井段6 180~6 188 m(图11),第10层与第12层的解释结果都为气层,第10层气层相似度为0.911,第12层气层相似度为0.739,但钻井取心结果未显示油气,而测井响应数据也与钻井结果不相符。由此可见,二维云模型法作为一种数学手段,是作为传统测井解释方法的补充以实现复杂介质的优化解释,当测井响应

表5 常规解释结果与云模型解释结果对比

Table 5 Comparison between conventional interpretation results and cloud model interpretation results

| 层位 | 平均孔隙度/% | 平均含气饱和度/% | 气层相似度 | 差气层相似度 | 常规解释结果 | 云模型解释结果 | 层位 | 平均孔隙度/% | 平均含气饱和度/% | 气层相似度 | 差气层相似度 | 常规解释结果 | 云模型解释结果 |
|----|---------|-----------|-------|--------|--------|---------|----|---------|-----------|-------|--------|--------|---------|
| 1  | 10.3    | 68        | 1.000 | 0.000  | 气层     | 气层      | 26 | 5.1     | 65        | 0.135 | 0.937  | 差气层    | 差气层     |
| 2  | 9.1     | 66        | 1.000 | 0.000  | 气层     | 气层      | 27 | 5.8     | 64        | 0.429 | 0.271  | 差气层    | 气层      |
| 3  | 6.7     | 65        | 0.851 | 0.003  | 气层     | 气层      | 28 | 6.3     | 67        | 0.657 | 0.032  | 气层     | 气层      |
| 4  | 6.6     | 64        | 0.839 | 0.006  | 气层     | 气层      | 30 | 4.4     | 62        | 0.027 | 0.485  | 差气层    | 差气层     |
| 6  | 5.4     | 61        | 0.251 | 0.726  | 差气层    | 差气层     | 31 | 4.5     | 65        | 0.034 | 0.581  | 差气层    | 差气层     |
| 7  | 4.5     | 64        | 0.035 | 0.590  | 差气层    | 差气层     | 32 | 4.4     | 64        | 0.026 | 0.474  | 差气层    | 差气层     |
| 9  | 5.1     | 60        | 0.147 | 0.980  | 差气层    | 差气层     | 34 | 7.1     | 68        | 0.821 | 0.000  | 气层     | 气层      |
| 10 | 7.2     | 63        | 0.911 | 0.000  | 气层     | 气层      | 35 | 5.2     | 64        | 0.167 | 0.897  | 差气层    | 差气层     |
| 11 | 4.7     | 63        | 0.058 | 0.822  | 差气层    | 差气层     | 36 | 6.5     | 71        | 0.656 | 0.009  | 气层     | 气层      |
| 12 | 6.4     | 65        | 0.739 | 0.019  | 气层     | 气层      | 37 | 5.5     | 65        | 0.275 | 0.581  | 差气层    | 差气层     |
| 13 | 7.7     | 64        | 1.000 | 0.000  | 气层     | 气层      | 38 | 4.3     | 63        | 0.020 | 0.371  | 差气层    | 差气层     |
| 15 | 5.3     | 62        | 0.208 | 0.830  | 差气层    | 差气层     | 39 | 4.7     | 62        | 0.059 | 0.830  | 差气层    | 差气层     |
| 17 | 6.8     | 65        | 0.874 | 0.002  | 气层     | 气层      | 42 | 6.8     | 68        | 0.808 | 0.001  | 气层     | 气层      |
| 18 | 7.1     | 66        | 0.867 | 0.000  | 气层     | 气层      | 44 | 6.4     | 67        | 0.703 | 0.018  | 气层     | 气层      |
| 19 | 4.3     | 65        | 0.020 | 0.360  | 差气层    | 差气层     | 45 | 5.0     | 60        | 0.120 | 1.000  | 差气层    | 差气层     |
| 21 | 4.7     | 63        | 0.058 | 0.822  | 差气层    | 差气层     | 47 | 4.2     | 61        | 0.016 | 0.279  | 差气层    | 差气层     |
| 22 | 4.5     | 63        | 0.035 | 0.598  | 差气层    | 差气层     | 49 | 5.6     | 65        | 0.320 | 0.467  | 差气层    | 气层      |
| 24 | 4.9     | 64        | 0.091 | 0.953  | 差气层    | 差气层     | 51 | 4.6     | 63        | 0.046 | 0.715  | 差气层    | 差气层     |
| 25 | 5.2     | 64        | 0.167 | 0.897  | 差气层    | 差气层     | 54 | 4.4     | 60        | 0.028 | 0.488  | 差气层    | 差气层     |

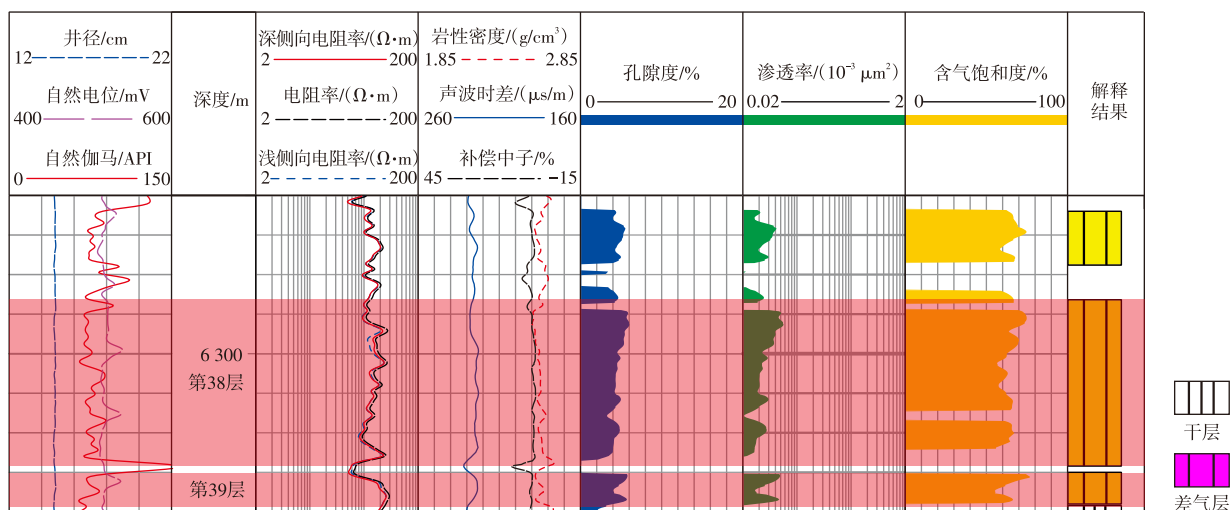


图8 库车坳陷克深区带A井第38层、第39层测井解释

Fig. 8 Well logging interpretation of layers 38 and 39 in well A, Keshen area, Kuqa Depression

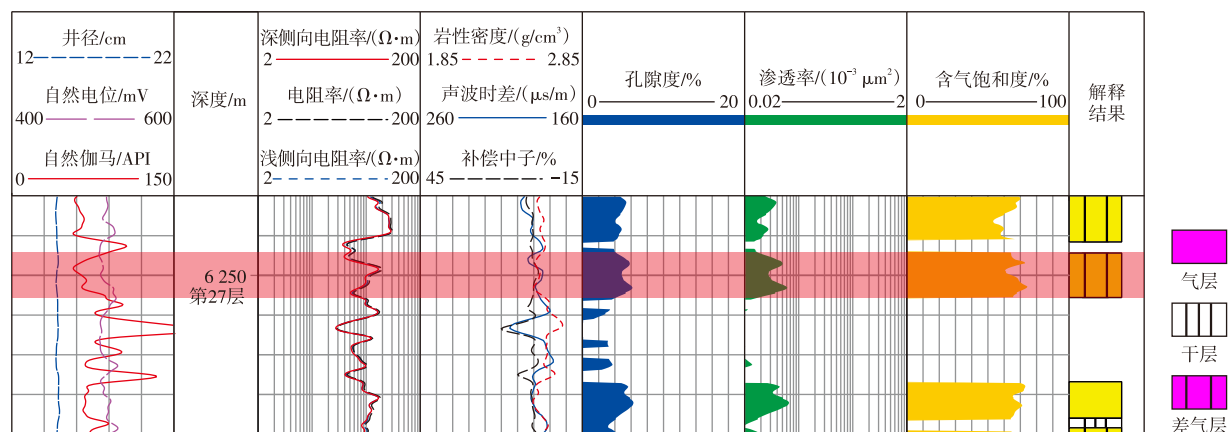


图9 库车坳陷克深区带A井第27层测井解释

Fig. 9 Well logging interpretation of layer 27 in well A, Keshen area, Kuqa Depression

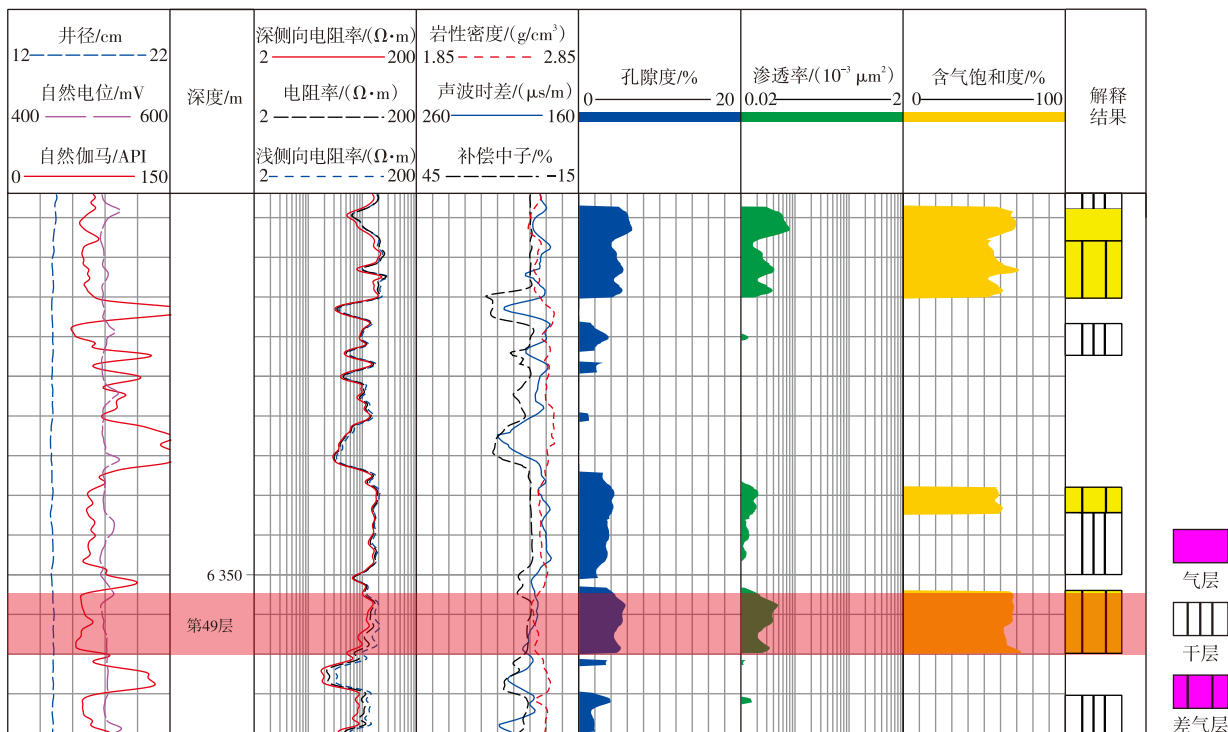


图10 库车坳陷克深区带A井第49层测井解释

Fig. 10 Well logging interpretation of layer 49 in well A, Keshen area, Kuqa Depression

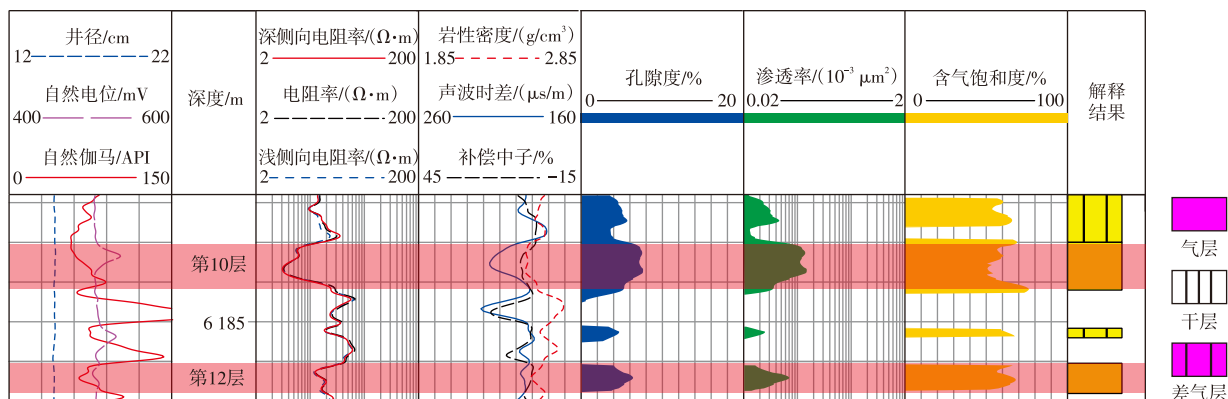


图11 库车坳陷克深区带A井第10层、第12层测井解释

Fig. 11 Well logging interpretation of layers 10 and 12 in well A, Keshen area, Kuqa Depression

数据与真实地层情况明显不符时,并不能提高测井解释精度。

## 4 结论

研究在常规测井解释的基础上引入二维云模型法,提出了一种适用于储层流体评价的二维云模型,主要得出以下结论:

1) 理论研究表明:二维云模型法能够较好地处理储层流体评价过程中存在的不确定性与模糊性问题,对常规测井评价结果起到了补充作用。二维云模型法作为一

种数学方法,依然需要依据测井岩石物理响应理论进行综合解释。

2) 相较于传统的单因素评价方法,二维云模型综合考虑了孔隙度与含气饱和度2个重要因素,并通过多个评价标准的相似度计算,获得符合统计学的量化指标。因此,相似度能够定量描述油气层的物性情况。

3) 在库车坳陷的储层分析中,云模型的评价结果与常规测井解释高度一致,尤其是在复杂地层中的效果显著。研究结果表明:云模型在储层流体评价中具有广泛的应用前景,可以推广到其他油气田储层的

分类与解释中,尤其适用于处理复杂、模糊和不确定的数据集。云模型作为一种新兴的不确定性人工智能方法,为复杂油气储层的勘探开发提供了新的技术支持。

#### 参考文献

- [1] 唐磊,王建峰,曹敬华,等.塔里木盆地顺北地区超深断溶体油藏地质工程一体化模式探索[J].油气藏评价与开发,2021,11(3):329-339.  
TANG Lei, WANG Jianfeng, CAO Jinghua, et al. Geology-engineering integration mode of ultra-deep fault-karst reservoir in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(3): 329-339.
- [2] 潘保芝,房春慧,郭宇航,等.基于岩石物理转换模型的苏里格致密砂岩储层测井评价与产能预测[J].地球物理学报,2018,61(12):5115-5124.  
PAN Baozhi, FANG Chunhui, GUO Yuhang, et al. Logging evaluation and productivity prediction of Sulige tight sandstone reservoirs based on petrophysics transformation models[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(12): 5115-5124.
- [3] 尹成芳,刘炜辰,杨虹,等.国外测井技术发展现状与趋势[J].世界石油工业,2024,31(6):77-87.  
YIN Chengfang, LIU Weichen, YANG Hong, et al. Advances in foreign well logging technology development[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(6): 77-87.
- [4] 李震,张金海,李桂山,等.低渗透裂缝性油藏测井侧向剩余油挖潜措施研究:以长庆A油田为例[J].石油地质与工程,2024,38(1):90-94.  
LI Zhen, ZHANG Jinhai, LI Guishan, et al. Potential tapping measures for lateral remaining oil in low permeability fractured reservoir logging: A case study of Changqing A oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2024, 38(1): 90-94.
- [5] LAI J, WANG G W, FAN Q X, et al. Toward the scientific interpretation of geophysical well logs: Typical misunderstandings and countermeasures[J]. Surveys in Geophysics, 2023, 44(2): 463-494.
- [6] 王岩泉,边伟华,刘宝鸿,等.辽河盆地火成岩储层评价标准与有效储层物性下限[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2):13-22.  
WANG Yanquan, BIAN Weihua, LIU Baohong, et al. Evaluation criterion and cut-off value of igneous rock reservoirs in Liaohe Basin [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2016, 40(2): 13-22.
- [7] 刘堂宴,郑勇,傅容珊,等.提高测井建模精度的一种方法[J].石油地球物理勘探,2002,37(1):44-47.  
LIU Tangyan, ZHENG Yong, FU Rongshan, et al. A method for improving precision of log model-building[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(1): 44-47.
- [8] 李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器[J].计算机研究与发展,1995,32(6):15-20.  
LI Deyi, MENG Haijun, SHI Xuemei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Journal of Computer Research and Development, 1995, 32(6): 15-20.
- [9] 杨朝晖,李德毅.二维云模型及其在预测中的应用[J].计算机学报,1998,21(11):961-969.  
YANG Zhaohui, LI Deyi. Planar model and its application in prediction[J]. Chinese Journal of Computers, 1998, 21(11): 961-969.
- [10] 王景春,张法.基于熵权二维云模型的深基坑施工风险评价[J].安全与环境学报,2018,18(3):849-853.  
WANG Jingchun, ZHANG Fa. Risk assessment of the deep foundation pit based on the entropy weight and 2-dimensional cloud model[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(3): 849-853.
- [11] 豆靖涛,郭玉娟.典型产业集聚区地下水污染风险评价与分区[J].能源与环保,2023,45(6):203-208.  
DOU Jingtao, GUO Yujuan. Risk assessment and zoning of groundwater pollution in typical industrial clusters[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(6): 203-208.
- [12] 霍小森,舒鑫宇,焦柳丹.突发公共卫生事件下城市轨道交通系统适灾韧性评估[J].都市轨道交通,2023,36(5):152-158.  
HUO Xiaosen, SHU Xinyu, JIAO Liudan. Disaster resilience assessment of urban rail transit systems under public health emergencies[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(5): 152-158.
- [13] LI Q F, LU L F, MA Q. Construction risk evaluation of poor geological channels based on cloud model-improved AHP-matter-element theory[J]. Sustainability, 2021, 13(17): 9632.
- [14] 赵晨程,高玉琴,刘钺,等.基于云模型的生态河道建设评价[J].水资源保护,2022,38(2):183-189.  
ZHAO Chencheng, GAO Yuqin, LIU Yue, et al. Evaluation of ecological river construction based on cloud model[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(2): 183-189.
- [15] 张亚光,李玉龙.云模型在测井曲线分层中的应用[J].计算机与数字工程,2014,42(9):1613-1616.  
ZHANG Yaguang, LI Yulong. Application of cloud model in logging curve hierarchical[J]. Computer & Digital Engineering, 2014, 42(9): 1613-1616.
- [16] 丁恺,赵福海,高莲凤,等.基于变分模态分解的营四段厚层砂砾岩地层细分层序[J].吉林大学学报(地球科学版),2024,54(4):1406-1418.  
DING Kai, ZHAO Fuhai, GAO Lianfeng, et al. Subdivision sequence of thick glutenite strata in the fourth member of Yingcheng formation based on variational mode decomposition[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024, 54(4): 1406-1418.
- [17] 吴泽兵,谷亚冰,姜雯,等.基于遗传优化算法的井底钻压智能预测模型[J].石油钻采工艺,2023,45(2):151-159.  
WU Zebing, GU Yabing, JIANG Wen, et al. Intelligent prediction models of downhole weight on bit based on genetic optimization algorithm[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(2): 151-159.
- [18] 刘桂花,宋承祥,刘弘.云发生器的软件实现[J].计算机应用研究,2007,24(1):46-48.  
LIU Guihua, SONG Chengxiang, LIU Hong. Software implementation of cloud generators[J]. Application Research of Computers, 2007, 24(1): 46-48.