

doi: 10.11720/wtyht.2024.1146

周军,边会媛,陈文安,等.牛东地区砂砾岩储层测井层内非均质性评价[J].物探与化探,2024,48(1):142-150. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1146>Zhou J, Bian H Y, Chen W A, et al. Log-based evaluation of intralayer heterogeneity of glutenite reservoirs in the Niudong area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 142-150. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1146>

牛东地区砂砾岩储层测井层内非均质性评价

周军¹, 边会媛¹, 陈文安², 张迪², 刘国良², 王飞³

(1. 西安科技大学 地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 青海油田勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202; 3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710064)

摘要:牛东地区砂砾岩储层具有低孔、低渗等特征,储层结构复杂,非均质性较强,常规测井对储层类型划分困难,影响了储层评价精度。岩心孔渗、薄片分析、X 衍射等测试资料表明,牛东地区砂砾岩储层具有较强的非均质性,且根据毛管压力形态可将储层分为 3 个类别。本次研究利用电成像测井资料对储层层内非均质性进行评价:首先对电成像测井资料进行处理得到储层孔隙度谱,再对随深度变化的孔隙度谱进行研究,分别计算不同深度上孔隙度谱的均值、方差、洛伦兹系数和集中程度函数;根据综合概率模型,利用层次分析法确定评价指标的权重,得到储层非均质性综合指数,据此对储层进行划分,并建立储层非均质性的评价标准。应用该方法得到的研究结果与压汞实验结果一致,说明利用该方法能够有效地评价储层非均质性,可丰富现有的储层非均质性评价方法,为储层的精细评价提供一定的理论支撑。

关键词:电成像测井;非均质性评价;压汞曲线;洛伦兹系数;储层分类**中图分类号:** P631.84**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-8918(2024)01-0142-09

0 引言

储层非均质性是指沉积环境、成岩作用和构造运动等活动在储层的形成过程中对其产生的影响,在空间和内部的不同性质上均存在变化,是影响地下油、气、水运移和油气运移的关键参数^[1-2]。对于储层非均质性的分类,早在 20 世纪 80 年代就有研究。Pettijohn 以及 Weber 分别提出了 5 类和 7 类划分方案^[3];裘怿楠^[4]根据油田开发情况,将储层非均质性划分为层间、平面、层内和孔隙非均质性四类。层间非均质性指层系的旋回性、砂砾层间的不均匀性、夹层分布等,其研究内容包括分层系数、垂直砂体密度、各砂层间渗透系数的不均匀程度、有效厚度系数及储层间非均质性评价方法。平面非均质性是指由于砂体中孔隙度、渗透率的平面变化所引起的储层规模和几何形态的不均匀性。层内非均质

性主要表现为颗粒尺寸的规律性、层理构造序列及横纵向渗透率之比在岩性、物性和沉积相等方面都存在不同程度的差异,其形成具有内在的复杂性,与形成的地质过程及原因密切相关^[5]。孔隙非均质性是指所含岩石的成分、包含的填隙物类型以及孔隙结构等方面存在不同^[6]。

学者多采用岩心分析与测井解释结合评价储层非均质性,并利用渗透率变异系数、突进系数、极差等参数,从多个方面对储层非均质性进行表征^[7]。边会媛等^[8]通过孔渗、X 衍射和薄片分析等方法得出柴达木盆地渐新统下干柴沟组储层有较强的非均质性,并通过广义神经网络实现全井段伪毛管压力曲线应用于储层类型预测;李海燕等^[9]通过压汞测试、扫描电镜和铸体薄片等资料分析储层的微观孔隙结构,并应用聚类分析和 Bayes 判别分析方法确定研究区的优质储层;袁红旗等^[10]利用洛伦兹曲线,提出综合定量表征储层非均质性的方法,比传统

收稿日期: 2023-04-10; **修回日期:** 2023-06-09**基金项目:** 国家自然科学基金项目(42304143);陕西省自然科学基金研究计划(2022JM-147)**第一作者:** 周军(2000-),男,硕士研究生,研究方向:测井评价与岩石物理研究。Email:akzhoujun@126.com**通讯作者:** 边会媛(1986-),女,副教授,主要从事复杂储层测井精细解释及岩石物理研究的教学与研究工作。Email:smilebianhuiyuan@126.com

仅基于渗透率指标所构建的参数能更好地反映储层非均质性;杨少春^[11]利用综合指数法对储层非均质性进行了定量刻划。相对于常规测井方法,电成像测井能够将采集到的数据转换成直观的图像,具有较高的垂直分辨率^[12],可以较为准确地反映井周地层的岩性及物性变化^[13]。Aghli 等^[14]利用电成像测井对孔隙度系统、渗透剖面和非均质性指数进行评价,认为电成像测井可用于评价储层非均质性;侯振学等^[15]对井壁微电阻率数据进行统计,提出了电阻率谱技术和分选指数的计算方法并对储层非均质性进行定量评价;李昌等^[16]利用岩心、成像测井资料,基于分形理论计算电成像测井图像的分形维数来定量描述储层非均质性;蔺敬旗等^[17]利用电成像测井的孔隙度谱及电阻率谱计算方法,定量表征了砂砾岩储层非均质性。

牛东地区侏罗纪储层岩性复杂,矿物成分多样,孔隙结构复杂,砂砾岩储层非均质性强,单一的表征参数无法对储层的非均质性进行全面评价。针对这一问题,本文将洛伦兹系数运用到电成像测井中,并引入集中程度函数,根据综合概率模型计算均值、方差、洛伦兹系数和集中程度函数,结合层次分析法,得到各个评价参数的权重,对储层非均质性进行定量评价,获得一种较为准确全面的层内非均质性评价标准。

1 研究区地质概况及储层特征

柴达木盆地的西北为阿尔金山,南为昆仑山,北界为祁连山,地势自 WN 向 ES 缓倾。柴达木板块被塔里木板块、华北板块、扬子板块以及青藏板块所包围,古地理位置与周邻板块间的位置变动、分散和聚集等因素对柴达木盆地的发育演变起着主导作用^[18]。研究区构造位置和岩性柱状图如图 1 所示,牛东地区在构造上是牛东鼻隆,属于三级构造^[8]。研究区位于柴北缘阿尔金山前东段牛东地区侏罗系,勘探区带主要有阿尔金山前段阶带、盆地腹部背斜构造带、祁连山前冲段带等。牛东地区的侏罗系为中生代现今残留地层,是油气储集区的重要组成部分。

牛东地区侏罗系储层岩石骨架为石英,岩屑成分复杂,主要为方解石和钠长石(图 2a)。储层粒度分布不均匀,以粗砂岩和中砂岩为主(图 2b)。由牛 X 井 3 620~3 623 m 区段的岩心铸体薄片可见,储层空间发育裂缝、贴粒缝和粒内溶蚀缝(图 3)。储层物性发育中等,平均孔隙度为 8.1%,平均渗

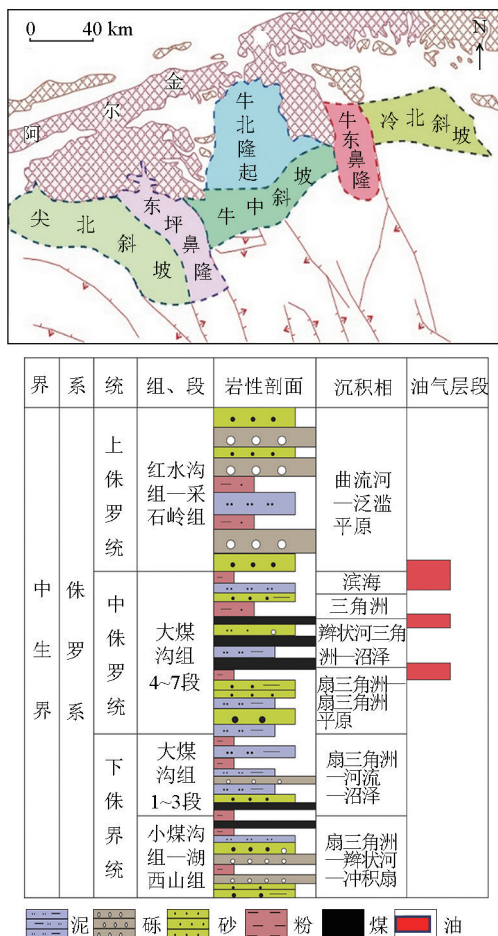


图 1 柴达木盆地牛东地区侏罗系构造位置及岩性柱状图
Fig. 1 Structural location and lithologic histogram of Jurassic in Niudong Area, Qaidam Basin

透率为 $0.63 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属于低孔低渗储层(图 4)。

根据牛东地区毛管压力参数统计分析,砂砾岩储集层的排驱压力最低为 0.042 MPa,最高为 0.76 MPa;平均吼道半径最低为 0.967 μm ,最高为 17.5 μm ;最大进汞饱和度最低为 58.9%,最高为 80.1%;退汞效率最低为 26.2%,最高为 38.7%。毛管压力曲线参数变化较大,牛东地区砂砾岩储层孔隙结构非均质性强。

2 电成像测井孔隙度谱的计算方法

已有研究表明,电成像测井所测量的电阻率不是地层的真实电阻率。在电成像测井中,电流的流动方式、聚集以及探测深度与侧向测井相似,可选用浅侧向电阻率作为刻度标准^[19]:

$$R_i = \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_i} R_{\text{LLS}}, \quad (1)$$

式中: R_i 是在第 i 次钮扣电极刻度之后的电阻率; σ_i 是对第 i 个钮扣电极进行预处理后的电导率; $\bar{\sigma}$ 是

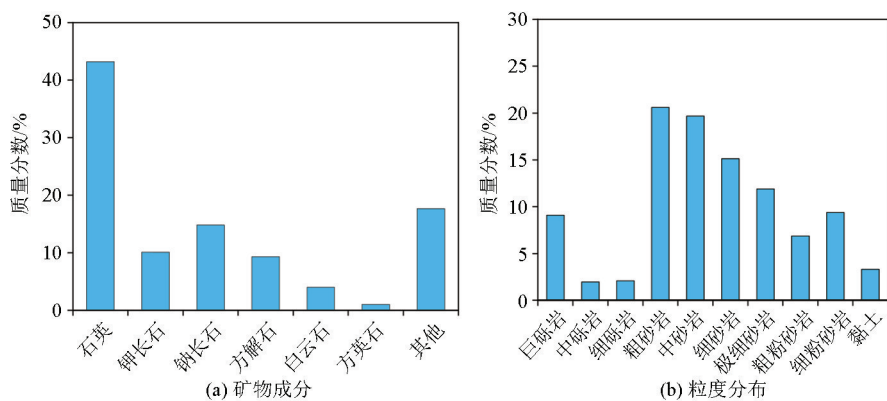


图 2 侏罗纪储层岩性特征

Fig. 2 Jurassic reservoir lithology

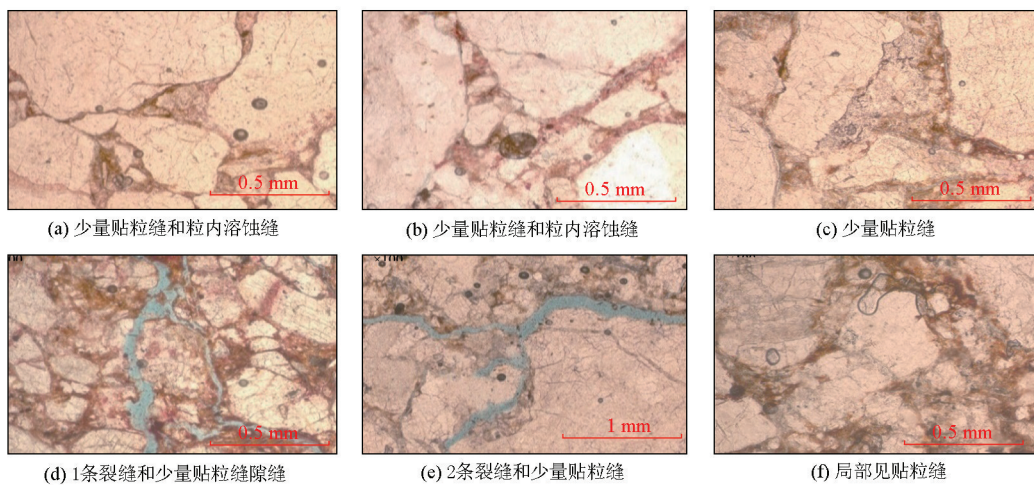


图 3 侏罗纪储层孔隙类型特征

Fig. 3 Characteristics of pore types in Jurassic reservoir

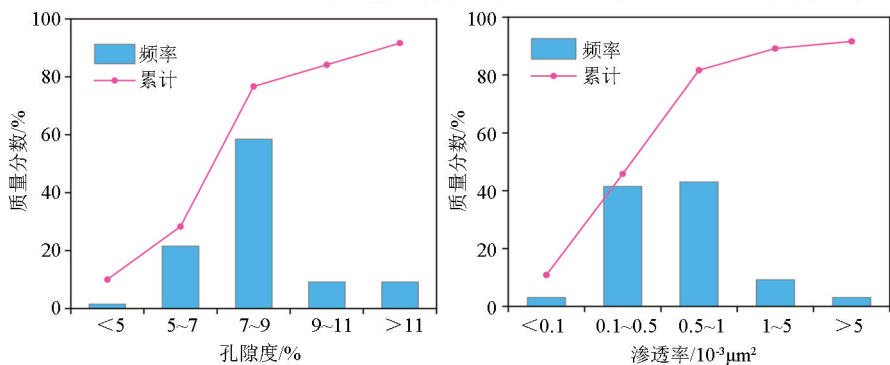


图 4 侏罗纪储层孔渗分布

Fig. 4 Jurassic reservoir porosity and permeability distribution

在取样深度区间中,每个钮扣电极的导电系数平均值; R_{LLS} 为浅侧向电阻率。

电成像测井测量的电阻率反映储层冲洗带的信息,利用阿尔奇公式进行标定^[20]:

$$\varphi^m R_{x_0} = \frac{abR_{\text{mf}}}{S_{x_0}^n}, \quad (2)$$

式中: a 、 b 为与岩性有关的系数; m 为胶结指数; n 为

饱和度指数; φ 为孔隙度; S_{x_0} 为冲洗带含水饱和度; R_{x_0} 为冲洗带电阻率; R_{mf} 为泥浆溶液电阻率。再把刻度后的电阻率 R_i 代入计算,得到的孔隙度记作为 φ_i ,用常规浅侧向电阻率 R_{LLS} 得到的孔隙度记作 φ_0 ,代入式(2)并整理得

$$\varphi_i^m R_i = \varphi_0^m R_{\text{LLS}} \quad (3)$$

再把式(1)代入式(3):

$$\varphi_i = \sqrt{\frac{\sigma_i}{\sigma}} \times \varphi_0 \quad (4)$$

通常选取一个图像窗口,利用式(4)依次计算每个窗口中成像测井点的孔隙度,得到对应地层的孔隙度谱。应用此方法处理研究区的电成像资料,得到3种典型的孔隙度谱分布类型(图5):I类储层,孔隙度谱以单峰窄谱为主,谱峰靠前,储层较均一,主要为基质孔,物性偏差,非均质性弱;II类储层,孔隙度谱以双峰为主,谱分布范围较宽,主峰相

对靠前,相比次生孔隙,基质孔隙更为发育,非均质性一般;III类储层,孔隙度谱以多峰宽谱为主,主峰相对靠后,相比基质孔隙,次生孔隙更为发育,非均质性强。

图6为牛东地区牛X井3340~3370 m井段储层孔隙度谱。牛X井孔隙度谱形态有单峰窄谱型、靠前的双峰宽谱型和靠后的多峰宽谱型。为了更精确评价砂砾岩复杂的孔隙结构和层内非均质性,对孔隙度谱做进一步分析。

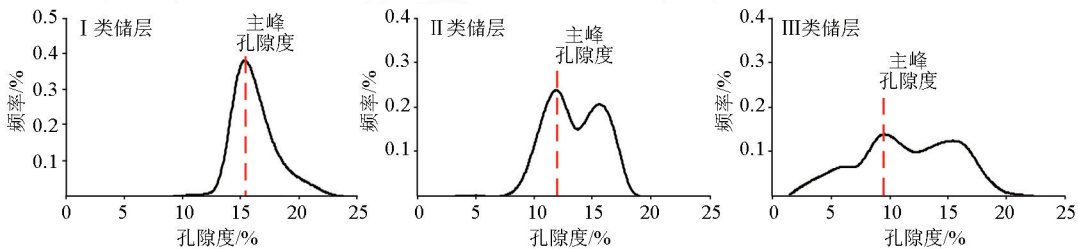


图5 孔隙度谱形态结构
Fig.5 Morphological structure of porosity spectrum

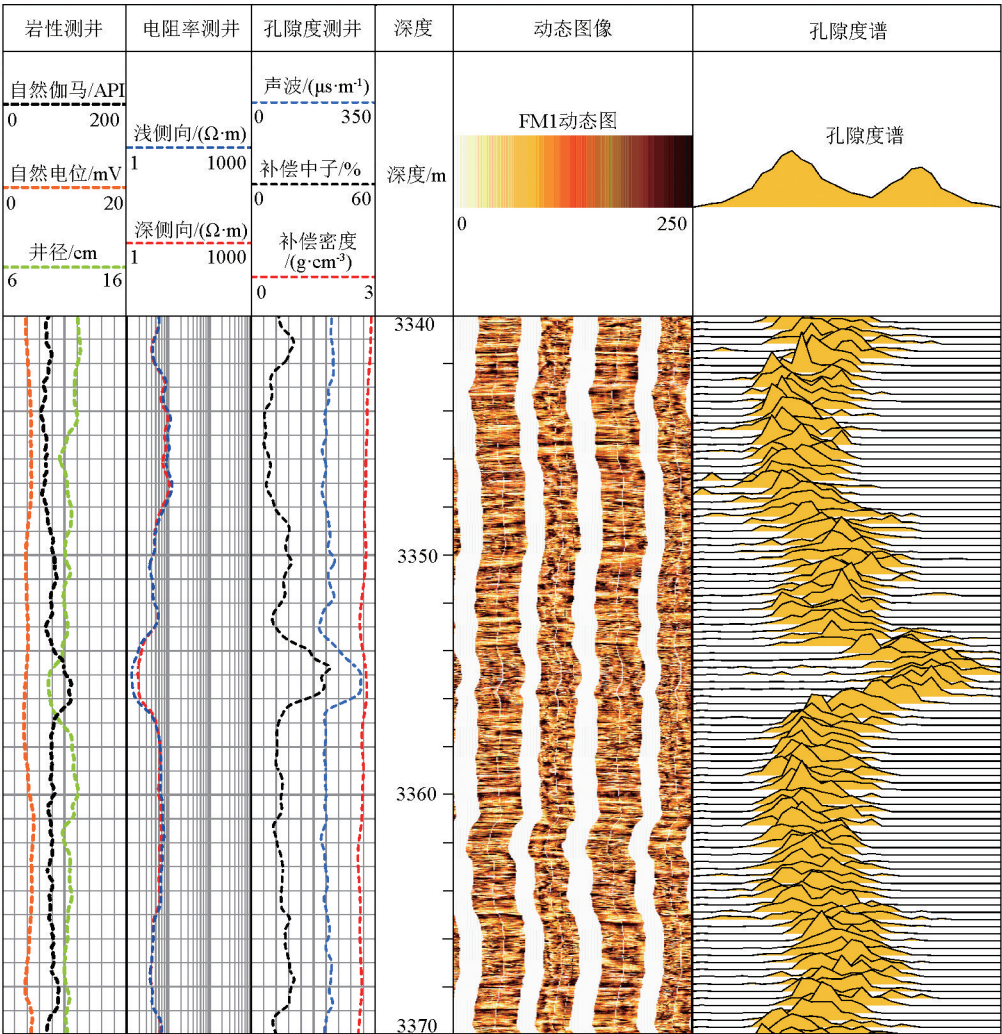


图6 牛东地区牛X井3340~3370 m砂砾岩孔隙度谱
Fig.6 Porosity spectrum of conglomerate 3340~3370 m from Niu X well in Niudong area

3 利用孔隙度谱评价储层层内非均质性

3.1 均值方差法评价储层层内非均质性

孔隙度谱均值(φ_a)指某一深度孔隙度的平均值,均值越大,储层特性越好;方差(φ_v^2)反映其频谱的离散度,方差越大,孔隙尺寸分布范围越广^[21]。计算公式为

$$\varphi_a = \sum_{i=1}^n \varphi_i p_i / \sum_{i=1}^n p_i, \quad (5)$$

$$\varphi_v^2 = \sum_{i=1}^n p_i (\varphi_i - \varphi_a)^2 / \sum_{i=1}^n p_i, \quad (6)$$

式中: φ_i 是用电成像方法测量测井曲线的孔隙度; p_i 为其对应孔隙度的频数。

3.2 洛伦兹系数法评价层内非均质性

洛伦兹系数又叫基尼系数,最早是在经济学中使用,而后广泛用于评价储层的非均质性。洛伦兹系数法是利用储集层实测资料的真实孔隙度贡献曲线和理想储集层绝对均质曲线所围的区域,与储集层的绝对均质曲线和纵轴所围区域的面积之比来反映储集层的非均质性程度^[22]。

将要计算的某深度段测井曲线的数值按一定顺序排列,得到 $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$; 它们的深度间隔为 Δd_i 。令:

$$Y_j = y_j / \sum_{i=1}^n y_i, \quad (7)$$

得到该深度段的洛伦兹曲线函数:

$$f(x_i) = \sum_{i=1}^j Y_i, \quad (8)$$

$$x_i = \sum_{i=1}^j \Delta d_i / \sum_{i=1}^n \Delta d_i. \quad (9)$$

图7中,横轴 x 上的点代表测井值所在的深度间隔;纵坐标 $f(x)$ 代表待求层段单条测井曲线上的测井值贡献;曲线 BMC 为洛伦兹曲线。洛伦兹曲线 BMC 和直线 BC 所围面积是反映储层非均质程度的重要指标,面积越大,非均质性也就越强。当曲线 BMC 与直线 BC 重合时,储层是完全均质的。洛伦兹系数值 L 可以表示为曲线 BMC 和直线 BC 的面积 S_1 与三角形 BCD 的面积 S_2 之比,即

$$L = \frac{S_1}{S_2} = 2S_1 = 2 \int_0^1 f(x) dx. \quad (10)$$

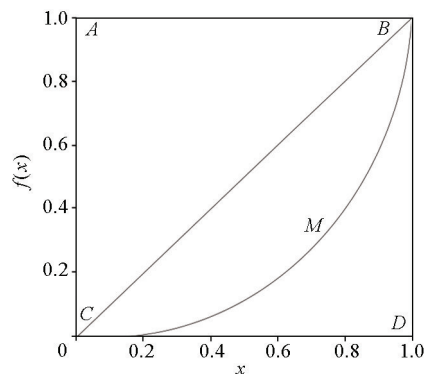


图7 洛伦兹系数计算示意

Fig. 7 Schematic diagram of Lorentz coefficient calculation

3.3 集中程度函数法评价储层层内非均质性

集中程度函数最初是在气象中表征云朵的分布情况,反映数据在一定程度上对平均态的偏离程度^[23]:

$$con(X) = 1 - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\bar{x}^{2n}}{[\bar{x}^2 + (x_i - \bar{x})^2]^n}, \quad (11)$$

式中: $con(X)$ 为集中程度函数; n 为阶数,一般大于3; $\bar{x}$ 为每个深度点孔隙度的平均值; x_i 为孔隙度值; N 为该深度点孔隙度数值的总数。通过定量计算 FMI 图像颜色分布的集中程度指标,可以定量评价储层的非均质性程度,集中程度函数值越小,分布越均匀,储层非均质性越弱。

4 综合概率法评价储层层内非均质性

综合概率法是通过对其目标的多种不同评价方法进行综合评判,得出一种综合概率指标,从而对该储层进行分类。相对于单独的非均质性评价方法,综合概率法是一种更加准确全面的评价方法^[24]。选择综合概率的方法,其关键在于选择综合概率函数的形式。本文选择的综合概率函数为

$$K = ax_i + by_i + mz_i + nw_i, \quad (12)$$

式中: K 为综合概率指数; x_i 为孔隙度均值; y_i 为孔隙度的方差; z_i 为孔隙度的洛伦兹系数值; w_i 为孔隙度的集中程度函数值; a, b, m, n 为各参数对应的权重。

4.1 利用层次分析法计算权重

层次分析法(AHP)最主要的就是构建参数判断矩阵,结合数学方法定性分析,再根据各个方案计算出的权重来解决问题。表1给出了参数比较的标度描述,表2为参数两两比较的结果。矩阵最大特征值为4.1237,对应的特征向量为{0.0725, 0.1414,

表 1 判断矩阵标度定义

Table 1 Scale definition of judgment matrix

标度	含义
1	两个参数相比,具有相同重要性
3	两个参数相比,前者比后者稍重要
5	两个参数相比,前者比后者明显重要
7	两个参数相比,前者比后者强烈重要
9	两个参数相比,前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻标度的中间值
倒数	与上述情况相反

表 2 参数权重的配对比较矩阵

Table 2 Paired comparison matrix of parameter weights

参数	均值	方差	洛伦兹系数	集中程度函数	权重
均值	1	1/3	1/8	1/7	0.0461
方差	3	1	1/7	1/5	0.0898
洛伦兹系数	8	7	1	2	0.5319
集中程度函数	7	5	1/2	1	0.3322

0.837 4,0.522 9},4 个参数对应的权重为{0.046 1,0.089 8,0.531 9,0.332 2}。对结果做一致性检验,得到一致性比例(CR)为0.045 8;CR<0.1,说明

各个参数之间的比较是合理的。

根据研究区地质特征,选取以上 4 个参数来融合非均质综合指数,以此来定量表征储层层内非均质性。由于所选取的参数具有不同的尺度,需要将其进行归一化处理:

$$f_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}(p - q) + q, \quad (13)$$

式中: f_i 为归一化后的值; X_i 为待处理值; $X_{\min}$ 为待处理参数组的最小值; $X_{\max}$ 为待处理参数组的最大值; p 、 q 为常数,也就是处理后所需要的范围,这里取 $p=1$ 、 $q=0$ 。

4.2 利用综合概率法进行储层分类

将储层孔隙度均值、方差、洛伦兹系数和集中程度函数归一化处理后,根据权重计算得到的综合概率 K ,当 $K \leq 0.07$ 时为 I 类储层, $0.07 < K \leq 0.2$ 时为 II 类储层, $K > 0.2$ 时为 III 类储层。对牛 X 井进行综合概率法层内非均质性评价,效果如图 8 所示。图

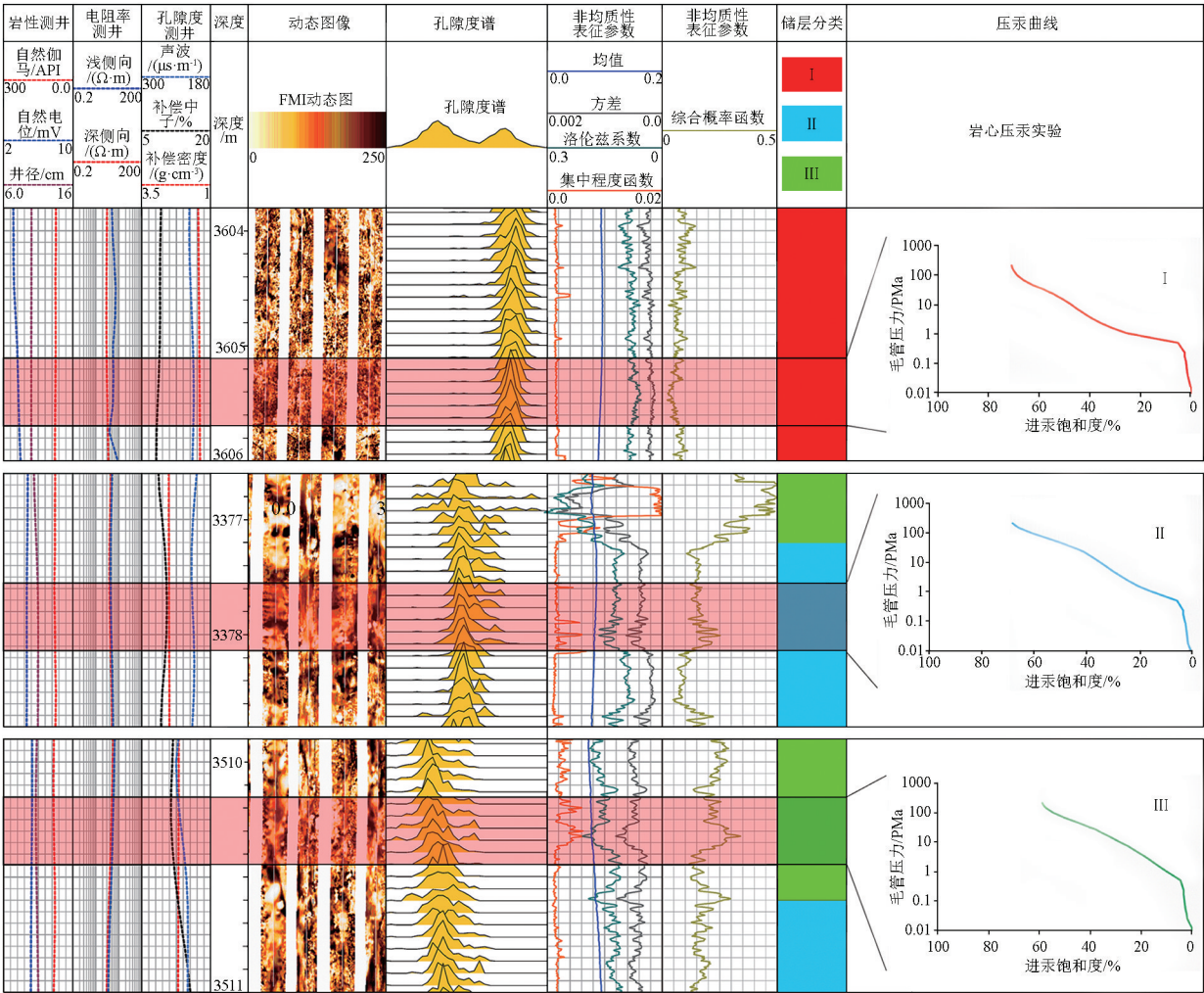


图 8 牛 X 井侏罗纪储层非均质性评价结果

Fig. 8 Results of Jurassic reservoir non-homogeneity evaluation in Niu X well

中给出了均值、方差、洛伦兹系数和集中程度函数 4 种非均质性表征参数曲线,还给出了综合概率函数曲线、储层分类结果以及利用压汞实验的毛管压力曲线,用于对分类效果进行验证。根据解释结果,3 605.32 m 为 I 类储层,排驱压力和中值压力均较小,毛管压力曲线较为平缓,非均质性弱;3 377.94 m 为 II 类储层,排驱压力较低,但中值压力缓升高,毛管压力曲线缓上升,非均质性一般;3 510.30 m 为 III 类储层,排驱压力和中值压力均偏高,毛管压力曲线平缓段变短,非均质性强。

将牛 X 井的毛管压力曲线按照综合概率法解释结果进行分类(图 9),并结合储层的粒度分析等资料对三类储层特征进行评价(表 3)。I 类储层综合概率值小于 0.07,孔喉连通性较好,为粗歪度,分选性较好,孔喉半径较大,表明储层的孔隙结构和渗流能力好,是本地区最好的孔隙结构类型,非均质性弱;以长石岩屑砂岩为主,含少量砾石,填隙物为泥质和方解石,碎屑颗粒破碎,见少量贴粒缝和粒内容蚀缝。II 类储层综合概率值在 0.07~0.2 之间,孔喉连通性一般,为中等歪度,分选性中等,表明储层

的孔隙结构和渗流能力中等,是本地区主要的储层,非均质性一般;为泥质含砾不等粒长石岩屑砂岩,颗粒分选较差,填隙物为泥质和方解石,碎屑颗粒破碎,未见孔隙。III 类储层综合概率值大于 0.2,孔喉连通性差,为细歪度,分选性较差,表明储层的孔隙结构和渗流能力差,非均质性强;以含泥砾质粗巨粒长石岩屑砂岩为主,填隙物为泥质和方解石,颗粒破碎剧烈,未见孔隙。

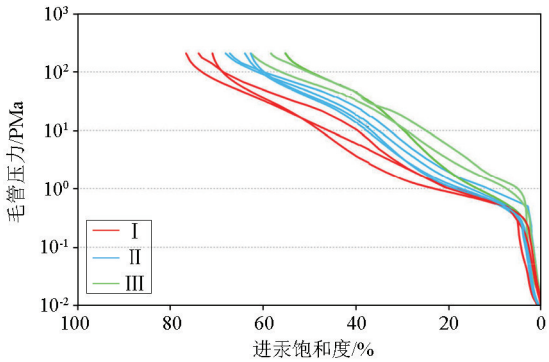


图 9 牛 X 井岩心压汞毛管压力曲线
Fig.9 Mercury capillary pressure curve
of core injection in Niu X well

表 3 综合概率值划分储层类型

Table 3 Classification of reservoir types by comprehensive probability values

储层类型	岩性	孔隙度范围	渗透率范围	洛伦兹系数	集中程度函数	综合概率函数	非均质性程度
		平均值/%	平均值/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$				
I	泥质长石岩屑砂岩	7.9 ~ 9.8	0.3 ~ 0.8	≤ 0.1	≤ 0.001	≤ 0.07	弱
		8.3	0.6				
II	砾质长石岩屑砂岩	7.1 ~ 8.2	0.28 ~ 0.7	0.1~0.15	0.001~0.002	0.07~0.2	一般
		7.5	0.42				
III	含泥砾不等粒砂岩	5.3 ~ 7.2	0.04 ~ 0.3	> 0.15	> 0.002	> 0.2	强
		6.6	0.2				

5 结论

1)研究区岩性复杂,矿物成分多样,储层孔隙发育裂缝、贴粒缝和粒内容蚀缝等多种类型,物性发育中等,孔喉类型复杂,毛管压力曲线参数变化较大,均表现出强非均质性。

2)引入洛伦兹系数和集中程度函数,根据电成像测井资料得到孔隙度谱,结合层次分析法计算各指标权重,利用综合概率函数对储层进行分类。该方法在柴达木盆地牛 X 井侏罗系储层非均质性评价和综合定量表征中取得较好效果。

3)研究区储层按照非均质性程度可划分为 3 类:I 类($K \leq 0.07$),孔喉连通性较好,粗歪度,分选性较好,为弱非均质性储层;II 类($0.07 < K \leq 0.2$),孔喉连通性一般,中等歪度,分选性中等,为中等非

均质性储层;III 类($K > 0.2$),孔喉连通性差,细歪度,分选性较差,为强非均质性储层。研究区储层主要发育强非均质性类型和中等非均质性类型。

参考文献(References):

[1] 吴海光,康逊,秦明阳,等.准噶尔盆地玛湖凹陷百口泉组砂砾岩非均质储层孔隙结构特征与成因[J].中南大学学报:自然科学版,2022,53(9):3337-3353.
Wu H G,Kang X,Qin M Y,et al. Pore structure characteristics and genesis of heterogeneous conglomerate reservoir of Baikouquan Formation in Mahu Sag,Junggar Basin[J]. Journal of Central South University:Science and Technology,2022,53(9):3337-3353.

[2] 陈秀娟,刘之的,刘宇羲,等.致密储层孔隙结构研究综述[J].物探与化探,2022,46(1):22-31.
Chen X J,Liu Z D,Liu Y X,et al. Research into the pore structure of tight reservoirs:A review[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(1):22-31.

[3] 吴元燕,陈碧珏.油矿地质学[M].2版.北京:石油工业出版社

- 社,1996.
- Wu Y Y, Chen B J. Petroleum geology[M]. 2th ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [4] 裴泽楠. 油气储层评价技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1993.
- Qiu Y N. Evaluation technology of oil and gas reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993.
- [5] Yang S S, Huang X R, Yin C, et al. Intra-layer heterogeneity of sandstone with different origins in deep-water environment and its causes[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2019, 21: 10-18.
- [6] 曹江骏, 罗静兰, 马迪娜·马吾提汗, 等. 微观非均质对砂砾岩储层致密化的影响机理:以准噶尔盆地东道海子凹陷 DN8 井区上二叠统梧桐沟组为例[J]. 地球科学, 2021, 46(10): 3435-3452.
- Cao J J, Luo J L, Madina M, et al. Influence mechanism of micro-heterogeneity on conglomerate reservoir densification: A case study of upper Permian Wutonggou formation in DN₈ area of dongdaohai-zi sag, Junggar Basin[J]. Earth Science, 2021, 46(10): 3435-3452.
- [7] 严科, 杨少春, 任怀强. 储层宏观非均质性定量表征研究[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 870-874, 879.
- Yan K, Yang S C, Ren H Q. Research on quantitative characterization of macroscopic heterogeneity of reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 870-874, 879.
- [8] 边会媛, 韩博华, 王飞, 等. 柴北缘牛东地区砂砾岩储层特征及分类评价[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(5): 894-901.
- Bian H Y, Han B H, Wang F, et al. Characteristics and classification of glutenite reservoirs in Niudong area, north margin of Qaidam Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(5): 894-901.
- [9] 李海燕, 岳大力, 张秀娟. 苏里格气田低渗透储层微观孔隙结构特征及其分类评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 133-140.
- Li H Y, Yue D L, Zhang X J. Characteristics of pore structure and reservoir evaluation of low permeability reservoir in Sulige gas field[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 133-140.
- [10] 袁红旗, 邓馨雨, 杜会尧, 等. 柳江盆地二叠系山西组露头致密砂岩储层非均质性表征方法[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 468-479.
- Yuan H Q, Deng X Y, Du H Y, et al. Characterizing the heterogeneity of tight sandstone in outcropped Permian Shanxi Formation, Liujiang Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 468-479.
- [11] 杨少春. 储层非均质性定量研究的新方法[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2000, 24(1): 53-56, 5.
- Yang S C. A new method for quantitatively studying reservoir heterogeneity[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2000, 24(1): 53-56, 5.
- [12] 田瀚, 杨敏. 碳酸盐岩缝洞型储层测井评价方法[J]. 物探与化探, 2015, 39(3): 545-552.
- Tian H, Yang M. The logging evaluation methods for fractured-vug-gy carbonate reservoirs[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(3): 545-552.
- [13] 崔裔瞳, 王祝文, 徐方慧, 等. 基于斯通利波及电成像测井数据对火成岩裂缝地层的特征分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2022, 52(2): 624-632.
- Cui Y T, Wang Z W, Xu F H, et al. Analysis of fracture formation characteristics of igneous rock based on stoneley wave and electrical imaging logging[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2022, 52(2): 624-632.
- [14] Aghli G, Moussavi-Harami R, Mohammadian R. Reservoir heterogeneity and fracture parameter determination using electrical image logs and petrophysical data: A case study, carbonate Asmari Formation, Zagros Basin, SW Iran[J]. Petroleum Science, 2020, 17(1): 51-69.
- [15] 侯振学, 于雪娟, 李东旭, 等. 电成像测井处理新技术在储层评价方面的应用[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(2): 573-578.
- Hou Z X, Yu X X, Li D X, et al. Application of new processing technology of electrical imaging logging in reservoir evaluation[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(2): 573-578.
- [16] 李昌, 司马立强, 沈安江, 等. 电成像测井储层非均质性评价方法在川东北 G 地区 FC 段地层的应用[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2): 725-732.
- Li C, Sima L Q, Shen A J, et al. The application of the reservoir heterogeneity evaluate method with microresistivity image log in FC formation of G region in northeastern Sichuan[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 725-732.
- [17] 蔺敬旗, 孟鑫, 李晴晴, 等. 砾岩储层电成像测井表征方法及应用——以准噶尔盆地玛湖凹陷砾岩油藏为例[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 126-131.
- Lin J Q, Meng X, Li Q Q, et al. Characterization method and application of electrical imaging logging in conglomerate reservoir: A case study in Mahu Sag of Junggar Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2): 126-131.
- [18] 徐凤银, 彭德华, 侯恩科. 柴达木盆地油气聚集规律及勘探前景[J]. 石油学报, 2003, 24(4): 1-6.
- Xu F Y, Peng D H, Hou E K. Hydrocarbon accumulation and exploration potential in Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(4): 1-6.
- [19] 左程吉, 王祝文, 向旻, 等. 基于电成像测井孔隙度分析技术的火山岩孔隙径向非均质性研究[J]. 石油物探, 2016, 55(3): 449-454.
- Zuo C J, Wang Z W, Xiang M, et al. The radial pore heterogeneity of volcanic reservoir based on the porosity analysis of micro-electric imaging logging[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(3): 449-454.
- [20] 王宇竹, 潘保芝, 郭宇航. 致密砂岩储层的相渗特征与岩电参数的关系研究[J]. 世界地质, 2017, 36(4): 1277-1283.
- Wang Y Z, Pan B Z, Guo Y H. Relationship between relative permeability and electrical parameters of tight sandstone reservoirs[J]. Global Geology, 2017, 36(4): 1277-1283.
- [21] 张帆, 高明, 陈国军, 等. 电成像孔隙度谱在砂砾岩有效储层识别的应用[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 488-495.
- Zhang F, Gao M, Chen G J, et al. Application of electrical imaging logging porosity spectrum in identification of effective reservoir in sandy conglomeratic reservoirs[J]. Science Technology and Engi-

- neering, 2022, 22(2): 488–495.
- [22] 岳崇旺, 杨小明, 钟晓勤, 等. 利用测井曲线的洛伦兹系数评价地层的非均质性[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2015, 45(5): 1539–1546.
- Yue C W, Yang X M, Zhong X Q, et al. Evaluation of formation heterogeneity using Lorentz coefficient of logging curves[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2015, 45(5): 1539–1546.
- [23] 王志仁, 吴辉斌, 吴德星. 集中程度函数及其初步应用[J]. 海洋学报, 2001, 23(2): 40–45.
- Wang Z R, Wu H D, Wu D X. Concentrative function and its primary application[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001, 23(2): 40–45.
- [24] 黄捍东, 刘徐敏, 蔡燕杰, 等. 综合利用测井—地震方法识别火成岩裂缝[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(5): 942–950, 805–806.
- Huang H D, Liu X M, Cai Y J, et al. Igneous rock fracture prediction with well logging and seismic data[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(5): 942–950, 805–806.

Log-based evaluation of intralayer heterogeneity of glutenite reservoirs in the Niudong area

ZHOU Jun¹, BIAN Hui-Yuan¹, CHEN Wen-An², ZHANG Di², LIU Guo-Liang², WANG Fei³

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Research Institute of Exploration and Development, Qinghai Oilfield Company, PetroChina, Dunhuang 736202, China; 3. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Glutenite reservoirs in the Niudong area exhibit low porosity and permeability, intricate reservoir structures, and pronounced heterogeneity, making it difficult to classify the reservoirs using conventional logs and further impairing reservoir evaluation accuracy. As indicated by the data from core porosity and permeability tests, thin-section analysis, and X-ray diffraction tests, the glutenite reservoirs in the Niudong area feature high heterogeneity and can be classified into three types based on capillary pressure morphologies. This study evaluated the intralayer heterogeneity of the reservoirs using electrical imaging logs. First, reservoir porosity spectra were derived from the electrical imaging logs. Then, the averages, variances, Lorenz coefficients, and concentration functions of the porosity spectra of different depths were calculated by analyzing these depth-varying porosity spectra. Based on the integrated probability model, the weights of evaluation indices were determined through hierarchical analysis, obtaining the composite index of reservoir heterogeneity. Accordingly, the reservoirs were classified, and the evaluation criteria for reservoir heterogeneity were established. The results of this study were consistent with the results of mercury injection experiments. The method used in this study proves effective in reservoir heterogeneity evaluation, enriching current methods for reservoir heterogeneity evaluation and providing theoretical support for fine-scale reservoir evaluation.

Key words: electrical imaging log; heterogeneity evaluation; mercury injection curve; Lorentz coefficient; reservoir classification

(本文编辑:叶佩,沈效群)