

低渗透-致密储层分类评价方法 ——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组下组合为例

沈卫民^{1,2,3}, 赵靖舟^{1,2}, 赵美丽³

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 中国石化 江苏油田分公司 采油二厂, 江苏 淮安 211600)

摘要:低渗透-致密储层的分类评价是油气勘探开发中亟待解决的难题。传统的方法要么只适用于常规储层, 要么对低渗透-致密储层的分类过于简单, 从而难以满足低渗透-致密储层勘探开发的实际需要; 一些新提出的评价方法虽然应用效果较好, 但参数获取难度大, 成本高, 难于推广。在对研究区储层基本特征进行铸体薄片分析、扫描电镜观察及高压压汞实验等研究的基础上, 结合大量数据处理和不同聚类分析方法, 建立了基于K均值算法聚类分析的低渗透-致密储层分类评价方法, 并借助孔-渗交会图实现了分类界限的数学表征。新建立的分类评价体系具有以下特点和优势: ①通过算法驱动突破了传统储层经验分类评价标准的局限性, 使分类更加科学。②综合运用反映储层物性和孔隙结构特征的8个主要参数(孔隙度、渗透率、分选系数、中值压力、中值半径、排驱压力、最大进汞饱和度和退汞效率)进行储层分类评价, 但最终结果仅用最能反映储层品质、也最易获取的孔隙度和渗透率2个参数来进行表征, 从而避免了大多数多参数储层评价参数获取难、不易推广应用的不足。③建立了以数学函数为边界的评价方法, 从而克服了传统“一刀切”的简单划分做法。运用该方法对鄂尔多斯盆地定边—富县地区三叠系延长组下组合长7—长9油层组低渗透-致密储层进行了分类评价和有利储层分布区预测, 为该地区甜点评价提供了依据。

关键词:分类; 评价; 聚类分析; 低渗透; 致密; 储层; 延长组; 鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Methods for classification and evaluation of low-permeability tight reservoirs: A case study of the lower Yanchang Formation, Ordos Basin

SHEN Weimin^{1,2,3}, ZHAO Jingzhou^{1,2}, ZHAO Meili³

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. No. 2 Oil Production Plant, Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Huai'an, Jiangsu 211600, China)

Abstract: The classification and evaluation of low-permeability tight reservoirs remain a pressing challenge in hydrocarbon exploration and exploitation. Traditional approaches are either tailored to conventional reservoirs or oversimplify the categorization of low-permeability tight reservoirs, limiting their practical applicability. Although some recently developed evaluation methods have shown promising results, their broad adoption is hindered by difficulties in parameter acquisition and high implementation costs. In this study, we examine the general reservoir characteristics in the study area using casting thin section observations, scanning electron microscopy (SEM), and high-pressure mercury injection (HPMI). Based on these results, combined with extensive data processing and multiple clustering algorithms, we propose a K-means clustering-based classification and evaluation method for low-permeability tight reservoirs. Furthermore, we mathematically define the classification boundaries using porosity-permeability cross plots. The proposed classification and evaluation system offers several advantages. By adopting an algorithm-driven approach, it overcomes the limitations of traditional experience-based criteria, thus providing more scientifically robust classification

收稿日期: 2025-07-02; 修回日期: 2025-08-27。

第一作者简介: 沈卫民(1997—), 男, 硕士研究生, 地质工程。E-mail: 2642353946@qq.com。

通信作者简介: 赵靖舟(1962—), 男, 教授, 油气成藏与非常规油气地质学。E-mail: jzzhao@xsyu.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05050)。

results. Although the proposed method integrates eight key parameters that capture reservoir physical properties and pore structure characteristics (i. e. , porosity, permeability, sorting coefficient, median pressure, median pore radius, displacement pressure, maximum mercury saturation, and mercury withdrawal efficiency), the final classification and evaluation results rely solely on porosity and permeability, which are both the most indicative of reservoir quality and the most accessible. Therefore, this method addresses the limitations of traditional ones, including difficulty in acquiring evaluation parameters and challenges associated with widespread application. Employing mathematically defined classification boundaries, it avoids the oversimplified “one-size-fits-all” cut-offs inherent to traditional classifications. The method has been applied to the classification and play fairway prediction of low-permeability tight reservoirs in the Chang 7-9 oil groups in the lower Yanchang Formation, Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin, providing a reliable basis for sweet spot evaluation in this area.

Key words: classification, evaluation, cluster analysis, low permeability, tightness, reservoir, Yanchang Formation, Ordos Basin

引用格式:沈卫民,赵靖舟,赵美丽. 低渗透-致密储层分类评价方法——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组下组合为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(5): 1717-1730. DOI: 10. 11743/ogg20250520.

SHEN Weimin, ZHAO Jingzhou, ZHAO Meili. Methods for classification and evaluation of low-permeability tight reservoirs: A case study of the lower Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(5): 1717-1730. DOI: 10. 11743/ogg20250520.

随着非常规油气勘探开发不断受到重视和致密油气勘探开发的日益深化,对低渗透-致密储层的评价提出了更高要求。主要体现在两个方面:①储层的分级评价需进一步细化;②各分类间的界限应尽量合理可行。为此,许多学者进行了有益的探索。如基于储层物性与压汞曲线形态和相关参数的经验分类法^[1-3]、基于流动单元划分的方法^[4-5]、联合压汞法^[6-7]、分形维数方法^[8-9]和聚类分析^[10-12]等方法。马立民等^[12]提出的分形维数方法能够将储层分类界限清晰给出,然而分形维数只是与渗透率有强相关性,而与孔隙度没有明显的相关性。李玢等^[6]基于岩相进行分形维数划分,并用孔隙度加权得出分形维数值,进而给出储层界限清楚的储层综合分类评价,但前提是先要正确划分岩相。林小云等^[13]利用流动单元的地层流动带指数(FZI)将复杂砂砾岩储层分为4类,并建立了较好的物性解释模型,但不同流动单元的物性依旧存在重叠。刘明熹等^[14]采用系统聚类分析方法将砾岩储层分为4类,但建立判别方程时,采用物性和压汞参数构建判别方程,不利于无压汞数据井的使用和推广。夏宏泉^[15]考虑工程和地质两方面因素建立了储层完井品质综合评价指标CQ,应用效果较好,但所使用的参数获取难度大、成本高,难于推广。

总之,前人在储层分类评价的深化探索方面虽然不同程度取得了进展,但目前多数储层分类评价在界限划分上多采用“一刀切”的划分方法,而实际上其所依据的各主要参数之间的关系比较复杂,或者分类后储层判别方程建立所需要的参数众多,以致许多划分标准在具体应用中很难取得应有的效

果,难以满足低渗透-致密储层甜点评价和有利储层评价预测的需要。为此,本文以目前作为鄂尔多斯盆地定边—富县地区勘探开发重点的三叠系延长组下组合(重点是长7—长9油层组)致密油储层为例,基于对大量实验资料的分析,探讨了多种方法在研究区低渗透-致密砂岩储层分类评价方面的应用,在此基础上建立了低渗透-致密砂岩储层分类评价方法及研究区储层分类评价标准,并对定边—富县地区三叠系延长组下组合部分致密储层进行了评价、预测。

1 区域地质背景

研究区定边—富县地区位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡中南部(图1),地处三叠纪古湖盆中心的东北侧,受东北物源控制。主要含油层系为三叠系延长组,主要研究目的层为延长组下组合的长7—长9油层组。三叠系在鄂尔多斯盆地发育纸坊组、延长组和富县组,其中延长组进一步可分为长1—长10共10个油层组。长7油层组(长7)自上而下分为长7¹、长7²和长7³共3个油层亚组,长8油层组(长8)分为长8¹和长8²油层亚组、长9油层组(长9)分为长9¹和长9²油层亚组。研究目的层长7、长8和长9砂岩在研究区定边—富县地区渗透率大多小于 $1.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度多数小于12%,为典型的致密砂岩储层,部分为低渗透储层,是目前研究区致密油勘探开发的重点层系。这3套砂岩沉积时期是三叠纪延长期古湖盆的扩张和鼎盛期,半深湖—深湖沉积发育,从而在研究区形成了长7张家滩

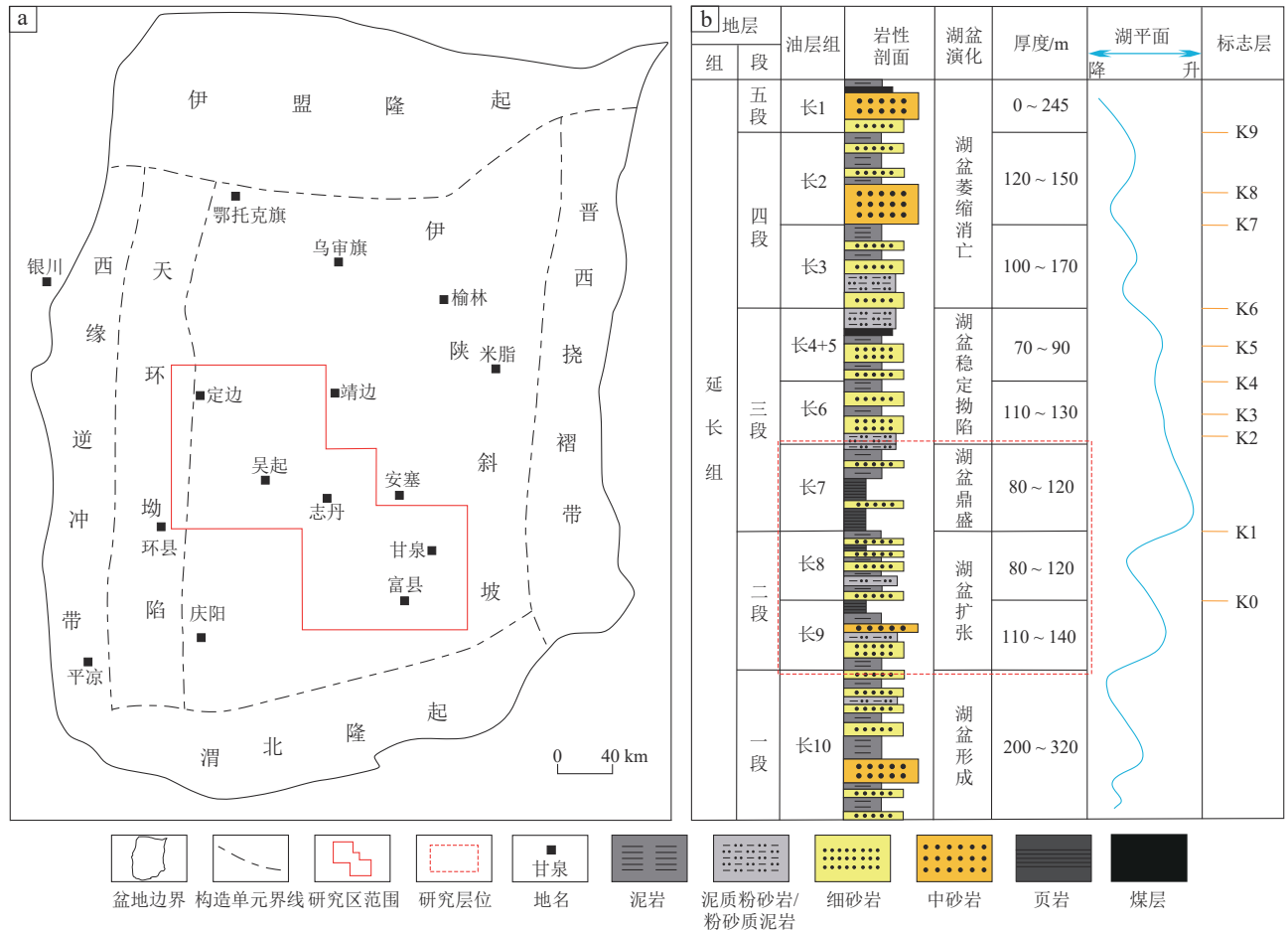


图1 鄂尔多斯盆地定边—富县地区构造位置(a)和延长组综合柱状图(b)(据文献[16]修改)
Fig. 1 Tectonic location of the Dingbian-Fuxian area in the Ordos Basin (a) and the composite stratigraphic column of the Yanchang Formation in the area (b) (modified after reference [16])

页岩和长9李家畔页岩2套优质烃源岩层,是已发现致密油和常规油藏的主要油源。

2 储层特征

2.1 储层岩石学特征

根据研究区(以甘泉地区为例)岩矿薄片鉴定结果,主力产油层长8储层的岩性主要为长石细砂岩和岩屑长石细砂岩(图2)。矿物碎屑组分中长石含量最多,平均值为40.9%,以斜长石为主;其次是石英含量,平均值为31.7%;岩屑含量最少,平均值为11.8%,以变质岩岩屑为主。磨圆度主要是次棱状,分选类型主要是中-好。胶结物主要为绿泥石,伊利石次之。早期绿泥石以薄膜的形式生长在颗粒边缘从而保护储层,中、晚期以绒球状生长在孔隙和喉道中,导致储层变差。黏土矿物主要为伊利石、高岭石、绿泥石和伊/蒙混层,其相对含量依次为45%,30%,13%和12%。

2.2 储层孔隙类型及物性特征

根据铸体薄片观察结果(图3),研究区长8砂岩储

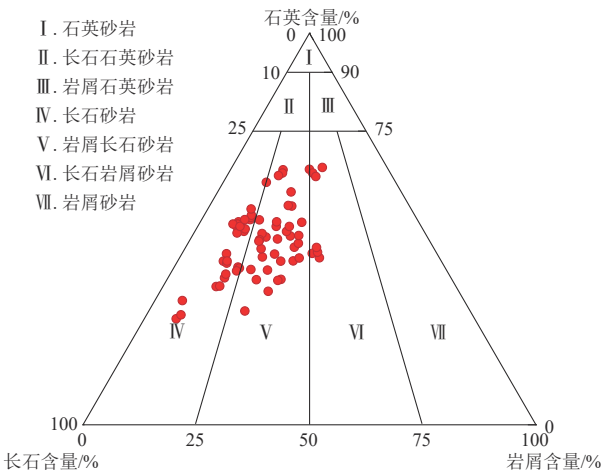


图2 鄂尔多斯盆地甘泉地区长8油层组岩性组成三角图
Fig. 2 Ternary diagram showing the lithology of the Chang 8 oil group in the Ganquan area, Ordos Basin

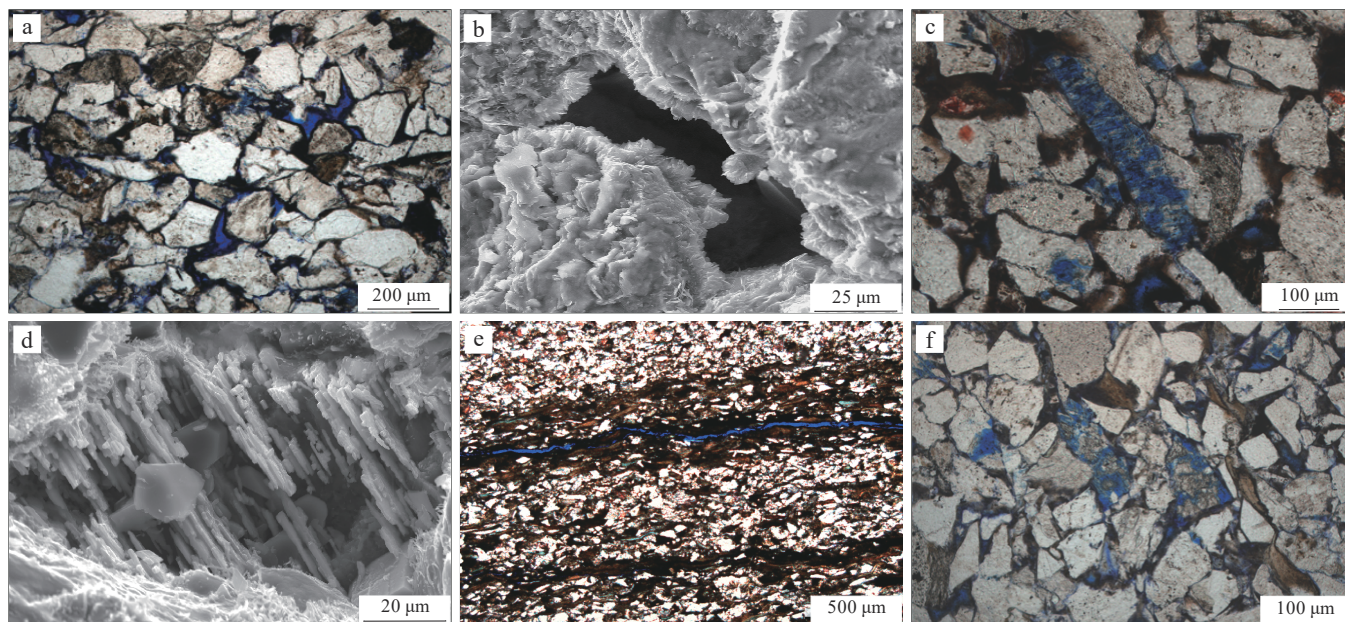


图3 鄂尔多斯盆地甘泉地区储层孔隙类型典型显微照片

Fig. 3 Representative images showing diverse types of pores in reservoirs of Ganquan area, Ordos Basin

a. 残余粒间孔, B2井, 长8油层组, 埋深1 162.08 m, 铸体薄片; b. 残余粒间孔, X81井, 长8油层组, 埋深1 125.05 m, 扫描电镜; c. 长石溶蚀, W192井, 长8油层组, 埋深1 152.83 m, 铸体薄片; d. 长石溶孔, QT2井, 长8油层组, 埋深1 444.07 m, 扫描电镜; e. 裂缝, W200井, 长9油层组, 埋深1 216.90 m, 铸体薄片; f. 岩屑溶孔, W193井, 长8油层组, 埋深998.86 m, 铸体薄片

层面孔率主要分布在0.5%~9.0%, 平均值为3.1%, 主要孔隙类型为残余粒间孔、长石溶孔、岩屑溶孔和裂缝。在强烈的压实作用下, 微裂缝多与黑云母并存且裂缝方向与黑云母定向排列方向一致。

对甘泉地区长8储层常规物性进行统计分析, 孔隙度主要分布在4.00%~10.00%、平均值为6.67%, 渗透率主要分布在 $(0 \sim 0.80) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、平均值为 $0.52 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图4)。

2.3 储层孔隙结构

对研究区的压汞数据进行统计分析, 以甘泉分区长8油层组为例, 共有172组压汞实验分析数据和172条实测压汞曲线(图5), 采用机器学习方法进行分类。

依据的储层参数共3类8种, 包括: 表征孔喉大小的排驱压力、中值压力和中值半径; 表征孔喉分选性的分选系数、歪度和变异系数; 表征孔喉连通性的最大进汞饱和度和退汞效率。对上述压汞特征参数进行聚类分析, 得出4种压汞曲线类型(表1), 由好到差依次为I—IV类(图6)。I类压汞曲线呈现宽缓形态, 最大进汞饱和度(S_{Hg})平均值最大, 达80.3%; 排驱压力平均值最小, 为2.8 MPa; 分选系数平均值最大, 为1.3, 分选较好, 孔隙连通性好, 是最好的储层类型。II类压汞曲线呈现较缓形态, 最大进汞饱和度平均值为61.5%; 排驱压力平均值较小, 为4.3 MPa; 孔喉以中、小孔喉为主, 分选系数平均值较大, 为1.1, 分选性较好, 孔隙连通性较好, 是较好的储层类型。III类压汞曲线呈现先

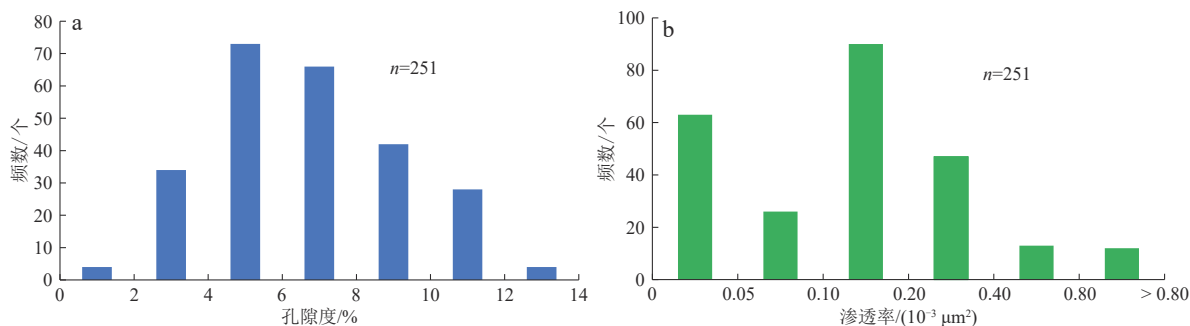


图4 鄂尔多斯盆地甘泉地区长8油层组储层孔隙度(a)和渗透率(b)频数分布直方图

Fig. 4 Histograms showing the porosity and permeability distribution in reservoirs of the Chang 8 oil group, Ganquan area, Ordos Basin (n 为样品个数。)

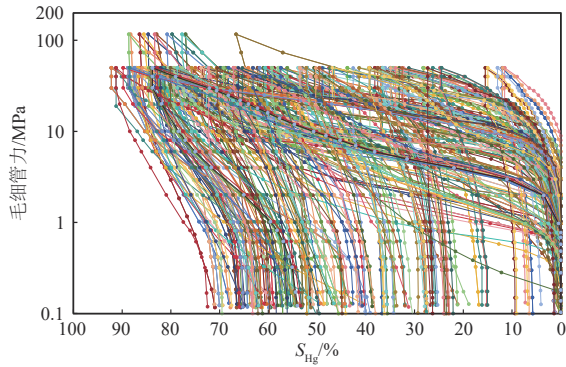


图5 鄂尔多斯盆地甘泉地区长8油层组压汞曲线

Fig. 5 HPMI curves of the Chang 8 oil group, Ganquan area, Ordos Basin

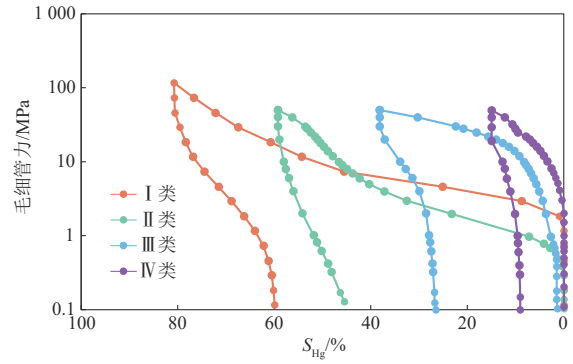
(S_{Hg}为进汞饱和度。图为172条实测压汞曲线的叠合。)

图6 鄂尔多斯盆地甘泉地区长8油层组储层压汞曲线类型

Fig. 6 HPMI curve types of reservoirs in the Chang 8 oil group, Ganquan area, Ordos Basin

(S_{Hg}为进汞饱和度。)

表1 鄂尔多斯盆地甘泉地区长8油层组储层孔隙结构分类数据

Table 1 Pore structure classification for reservoirs in the Chang 8 oil group, Ganquan area, Ordos Basin

压汞曲线 类型	特征值	歪度	分选 系数	变异 系数	中值 压力/MPa	中值 半径/ μm	排驱 压力/MPa	最大 S _{Hg} /%	退汞 效率/%
I类	最大值	0.5	2.6	0.3	23.8	1.5	7.6	92.2	55.2
	最小值	-3.5	0.7	0.1	0.2	0	0.1	61.0	9.6
	平均值	-0.4	1.3	0.1	10.7	0.1	2.8	80.3	27.0
II类	最大值	-0.3	1.8	0.1	49.0	0.1	10.2	74.2	52.1
	最小值	-4.1	0.6	0	13.9	0	0.8	50.3	12.4
	平均值	-1.5	1.1	0.1	30.6	0	4.3	61.5	26.4
III类	最大值	-0.6	1.7	0.1	0	0	12.7	49.5	39.3
	最小值	-5.7	0.5	0	0	0	0.9	27.3	3.7
	平均值	-2.6	0.9	0.1	0	0	6.6	38.1	26.9
IV类	最大值	0.7	1.5	0.1	0	0	26.2	44.5	68.7
	最小值	-4.3	0.2	0	0	0	1.2	11.5	36.9
	平均值	-2.7	0.7	0.1	0	0	11.6	21.5	45.1

注:S_{Hg}为进汞饱和度。

陡后缓形态,最大进汞饱和度不足50.0%,平均值为38.1%;排驱压力平均值较大,为6.6 MPa;孔喉发育程度较低且较小,中、小孔隙占比较大;分选系数平均值较小,为0.9,分选性较差,是较差的储层类型。IV类压汞曲线呈现先陡后略缓的曲线形态,最大进汞饱和度平均值仅为21.5%;排驱压力最大值达26.2 MPa,平均值为11.6 MPa;小孔隙占主体,孔喉连通差,是最差的储层类型,大多难以作为有效的油气储集体。

3 储层分类评价

如前所述,传统的储层分类评价方法主要基于经验,评价标准带有较大的人为性,所划分的界限常常简单“一刀切”,从而在实际中很难有效应用。为解决此难题,笔者尝试了多种方法,其中重点尝试了流动单元

划分方法和聚类分析法。以下就这两种方法尝试的结果加以讨论。

3.1 流动单元的地层流动带指数(FZI)分类法

Heran 等于1984年提出流动单元概念,指在横向和垂向上连续的储集带,该带内岩性特点和影响流体流动的岩石物理特征(主要是孔隙度和渗透率)都相似^[17]。Amaefule 等于1993年提出以Kozeny-Carman公式为基础、基于FZI的流动单元分类方法^[18]。依据FZI值的流动单元分类方法,将渗透率划分为不同的类型,进而实现渗透率分类和储层分类评价。

截至目前,已提出的流动单元划分方法可归纳为以下6类:①微观孔隙结构法,利用高压压汞曲线获得 R_{35} ,或者利用Winland方程求取 R_{35} ^[19];另一种是FZI法^[18];②沉积物性综合法^[20-23];③生产动态资料法^[24];

④沉积、成岩与构造综合法;⑤沉积、物性和渗流参数综合法^[25];⑥沉积、物性、渗流参数和FZI综合法^[26-28]。其中FZI法应用较广。

流动单元的指标包括如下参数:油藏品质指数(RQI,无量纲)、标准化孔隙体积(Φ_z ,无量纲)和地层流动带指数(FZI,无量纲)。定义油藏品质指数为:

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{K}{\Phi_e}} \tag{1}$$

定义孔隙体积和颗粒体积之比为标准化孔隙体积:

$$\Phi_z = \frac{\Phi_e}{1 - \Phi_e} \tag{2}$$

则流动带指数的定义为:

$$FZI = \frac{RQI}{\Phi_z} \tag{3}$$

式中:K为渗透率,10⁻³ μm²;Φ_e为有效孔隙度,%。

根据研究区目的层岩心物性分析测得的孔隙度和渗透率进行统计,分别计算RQI、Φ_z和FZI值,绘制FZI累积概率图和频数分布直方图(图7)。图中同一斜率的直线段即为同一流动单元,据此可将研究区储层划分为5类流动单元,各流动单元转折点的FZI值在累

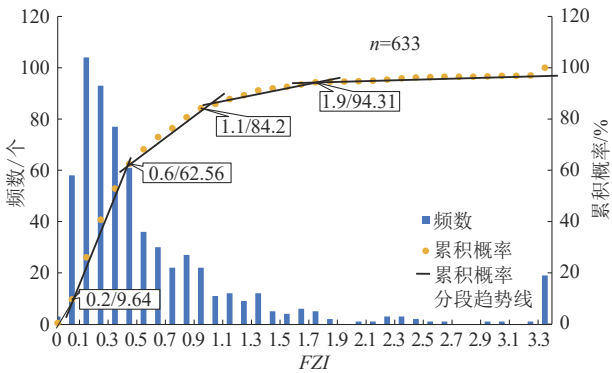


图7 鄂尔多斯盆地定边—富县地区FZI累积概率和频数分布直方图

Fig. 7 Cumulative probability percentage and frequency distribution of flow zone indicator (FZI) values in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin
(n为样品个数。FZI为流动单元的地层流动带指数。)

积概率图中标出。

根据图7的划分结果,可以得到研究区储层流动单元划分结果(表2)以及各流动单元在孔-渗交会图上的分布(图8)。由分类表可见流动单元从I—V类,孔隙度的平均值在减小,而渗透率的平均值在变大,呈现相反的变化趋势,这显然不符合一般储层评价的逻辑,即储层评价级别越高,其孔隙度和渗透率值应该越大。而且,从定义上看,油藏品质指数与归一化孔隙度的比值为FZI值,如果K和Φ_e同时扩大或缩小合适的倍数,便会得到相同的FZI值^[29],这同样不符合储层评价的一般逻辑。

因此,流动单元划分所采用的FZI法无法用于储层分类评价。为此,有研究者提出运用地层系数(渗透率×有效厚度)和有效储存系数[孔隙度×有效厚度×(1-束缚水饱和度)]进行流动单元划分^[25]。但有效厚度和束缚水饱和度的确定是较复杂的一个难题,影响因素较多。

3.2 聚类分析法

聚类分析是一种基于数据内在结构特征的无监督机器学习方法,核心目标是通过量化样本间的相似性

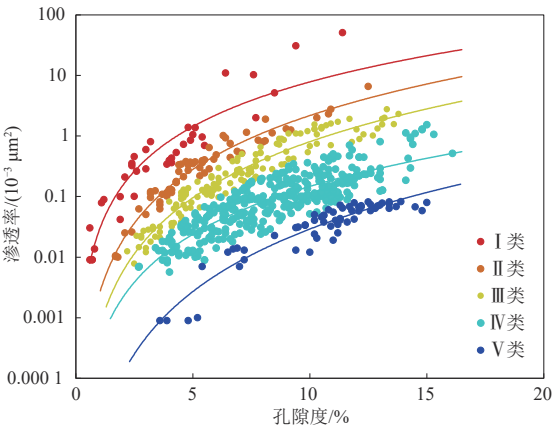


图8 鄂尔多斯盆地定边—富县地区流动单元分类后的孔-渗交会图

Fig. 8 Porosity-permeability crossplot as grouped by HFUs for reservoirs in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

表2 鄂尔多斯盆地定边—富县地区流动单元分类

Table 2 Classification of hydraulic flow units (HFUs) for reservoirs in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

流动单元类型	FZI	FZI样本个数	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
I类	< 0.2	61	(3.60 ~ 15.00)/10.58	(0.001 ~ 0.082)/0.044
II类	0.2 ~ 0.6	335	(2.70 ~ 16.10)/8.53	(0.006 ~ 1.540)/0.147
III类	0.6 ~ 1.1	137	(2.20 ~ 13.80)/7.07	(0.008 ~ 2.761)/0.463
IV类	1.1 ~ 1.9	64	(1.70 ~ 12.50)/5.35	(0.010 ~ 6.578)/0.573
V类	≥ 1.9	36	(0.60 ~ 11.40)/3.89	(0.009 ~ 50.569)/3.394

注:孔隙度和渗透率数据格式为(最小值~最大值)/平均值。FZI为流动单元的地层流动带指数。

或距离度量,将高同质性的观测对象划分为若干子集(即类簇)。自1955年首次提出K-means聚类算法后,至今已发布了数千种聚类算法^[30]。目前使用较多的社会科学统计软件包(statistical package for the social sciences,简称SPSS)软件优选了3种聚类算法:K均值聚类、层次聚类和二阶聚类。

层次聚类通过构建树状图逐步合并数据点,形成分类图,根据需求从树状图中确定分类。其优点是无需预设聚类数,结果为可视化树状图且支持多种数据结构,缺点是计算复杂度高,不适合大规模数据且对异常数据比较敏感。K均值聚类是基于划分的算法,将数据分为K个互斥子集,通过不断迭代中心位置,最小化类内差距,其优点是计算效率高且结果易于解释,缺点是对聚类中心比较敏感且数据需要标准化处理。二阶聚类是两步聚类,包括预聚类和层次聚类,其优点是自动选择聚类数且赋予数据权重,缺点是聚类可能损失细节信息。

3.2.1 聚类算法选择

对于鄂尔多斯盆地研究区延长组长7—长9油层组而言,选用压汞数据和物性数据进行储层分类评价。压汞样品共633个,数据量大,数据类型较多。经过3种聚类方法的尝试,结果如下:层次聚类分类导致将几百个样本与几个样品分在一起,不能将数据有效分类;用二阶聚类对数据处理后发现对压汞参数所赋权重很大,而对孔隙度和渗透率所赋权重很小,且不可以调整中间参数;用K均值聚类尝试分类发现,可以对大量数据进行快速处理,分类的各类样品数相对均衡,能够对数据合理赋予权重。

因此,K均值聚类算法更适合于研究区储层分类评价,故以下分析采用K均值聚类算法。

3.2.2 样本数据预处理

1) 参数选取

储层参数众多,选取的合理与否决定储层评价的质量。在压汞资料与沉积相、砂岩厚度、储层物性和含水饱和度等许多参数的组合分类中,兼具科学性和实用性的是压汞与储层物性的分类组合。

参数选取综合考虑了其地质意义和主成分分析(PCA)结果。分析对象包括孔隙度和渗透率2个物性参数以及3类共8项压汞参数。具体使用的压汞参数如下:表征孔喉大小的排驱压力、中值压力和中值半径;表征孔喉分选性的分选系数、歪度和变异系数;表征孔喉连通性的最大进汞饱和度和退汞效率。对

10个参数进行主成分分析,碎石图(图9)的横坐标为主成分编号(1—10),按特征值(携带的原始数据信息)降序排列。结果显示,第5个主成分处曲线斜率发生显著变化(拐点),结合特征值衰减趋势,确定保留5个主成分。

PCA提取的主成分并非原始参数本身,需通过分析成分矩阵(表3)建立其与原始参数的关联。碎石图确定的5个主成分均包含载荷绝对值大于0.5的原始变量。其中,成分2—成分5均能根据载荷绝对值最大原则唯一对应一个原始参数(分别为孔隙度、中值压力、退汞效率和渗透率)。相比之下,主成分1对应多个载荷绝对值大于0.5的变量。结合地质意义考量,从这些高载荷变量中选取了载荷绝对值最大的前4个参数:分选系数、最大进汞饱和度、排驱压力和中值半径。最终,确定用于分析的8个参数为:孔隙度、渗透率、分选系数、中值压力、中值半径、排驱压力、最大进汞饱和度和退汞效率。

2) 样本中异常值剔除

确定了储层分类评价的数据类型和具体参数,在正式分类之前对样本中的异常值进行筛选。剔除异常值的样本集合用于正式分类,能有效提高分类的准确性。绘制不同数据间的交会图(图10),找出并剔除明显偏离数据主体的异常值。孔-渗交会图(图10a)中,渗透率 $> 20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 及孔隙度 $\leq 2\%$ 的值去除;中值半径与排驱压力交会图(图10b)中,排驱压力 $> 30 \text{ MPa}$ 或中值半径 $> 1.0 \mu\text{m}$ 的样本值剔除;孔隙度与分选系数交会图(图10c)中,分选系数 > 4 的值剔除;中值半径与中值压力交会图(图10d)中,将显著偏离趋势线或非零点的值剔除。

3) 样本数据归一化处理

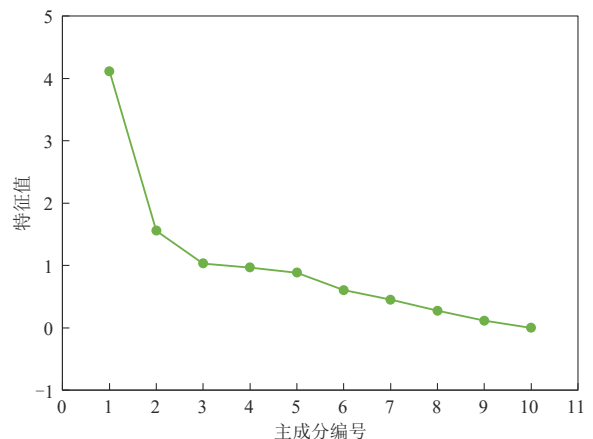


图9 鄂尔多斯盆地定边—富县地区主成分分析碎石图
Fig. 9 Scree plot from principal component analysis (PCA) of reservoirs in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

表3 鄂尔多斯盆地定边—富县地区主成分分析的成分矩阵

Table 3 PCA component matrix of reservoirs in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

参数类型	主成分编号				
	1	2	3	4	5
分选系数	0.811	0.521	—	—	—
最大 S_{Hg}	0.806	0.521	—	—	—
排驱压力	-0.751	—	—	—	—
中值半径	0.740	—	—	—	—
歪度	0.672	—	—	—	—
孔隙度	0.584	-0.523	—	—	—
变异系数	0.557	—	—	—	—
中值压力	—	—	0.727	—	—
退汞效率	—	—	—	0.961	—
渗透率	—	—	-0.548	—	0.75

注:“—”表示无数据。 S_{Hg} 为进汞饱和度;表中数值为相关系数。

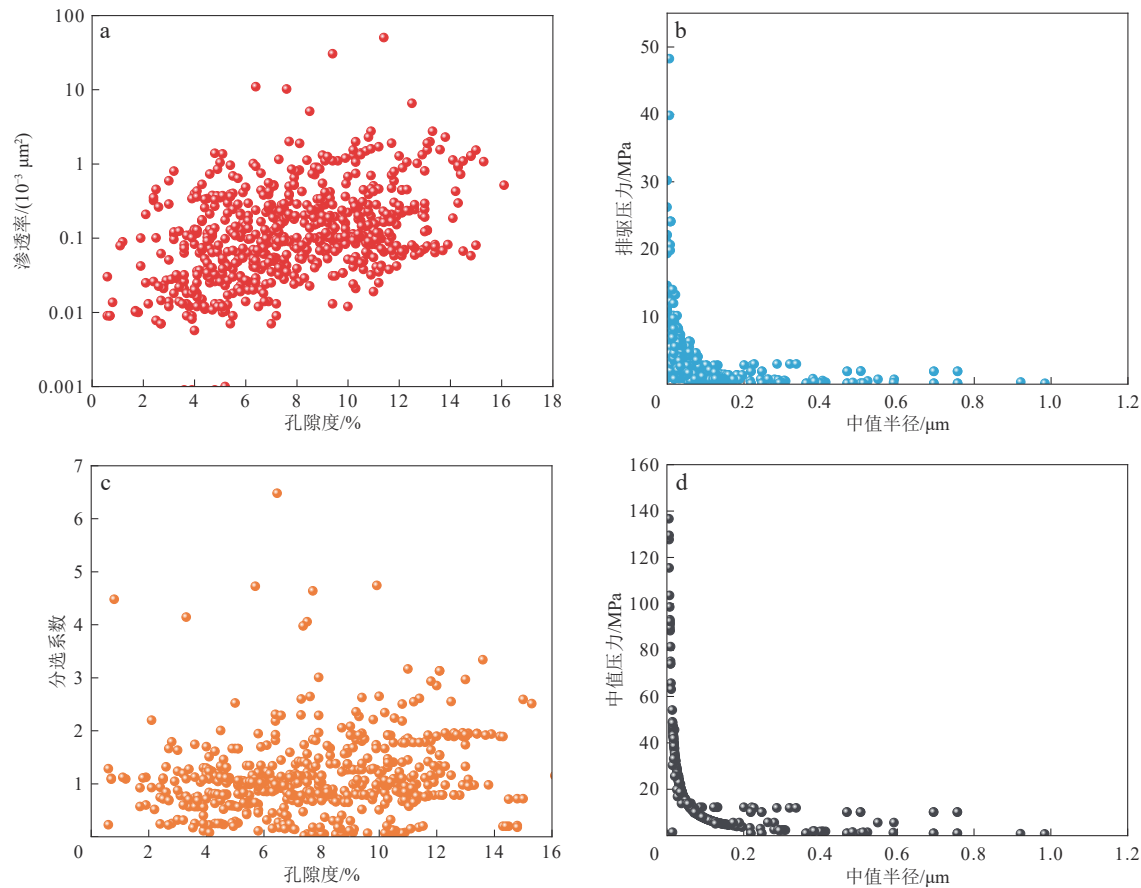


图10 鄂尔多斯盆地定边—富县地区去除异常值的分析参数交会图

Fig. 10 Filtered crossplots with outliers removed for reservoir classification and evaluation in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

a. 孔隙度与渗透率交会图; b. 中值半径与排驱压力交会图; c. 孔隙度与分选系数交会图; d. 中值半径与中值压力交会图

由于样本所选各参数量纲以及数据区间各不相同,正式K均值聚类分析之前必须对数据进行归一化处理。数据归一化的方法主要有两种,即最小-最大规范化方法和Z值标准化方法。两种归一化方法与原始数据得出的3种结果差距不大。因此,后续将基于

原始数据划分类型,以探寻更有效的办法。数据可分为线性变化(孔隙度等)、非线性变化(渗透率、排驱压力等)以及难以确定线性/非线性变化(中值压力),将非线性数据求对数,降成线性变化。随后,可参照最小-最大规范化方法,设置最大值与最小值之差一致

的区间范围。

4) 样本数据赋权重

在聚类分析中为数据赋权重旨在突出不同特征的重要性,从而优化聚类效果。常用方法包括基于特征重要性、统计分布或模型自动赋权。然而,本研究采用二阶聚类算法时,其自动赋予孔隙度和渗透率的权重与储层评价经验不符,孔隙度和渗透率的权重相对不足(图11)。为提升聚类结果的解释性和实用性,使其更贴合地质认知,选择结合储层经验知识与层次分析法(AHP)进行人工权重调整^[31]。

依据储层研究经验,物性参数(孔隙度和渗透率)是表征储层品质的关键指标,其权重应显著高于众多压汞参数。经过反复试验,初步设定物性参数的权重约为压汞参数的2倍时,可获得较好的分类效果。在此经验基础上,以优化孔-渗权重和结果有效性为目标,通过迭代分析精细调整权重,最终确定初始调试权重:孔隙度权重为2.0,渗透率权重为1.3,压汞参数权重

重为1.0。随后,基于此调试权重构建AHP判断矩阵(表4),并通过求解矩阵特征值计算得到最终各参数的客观权重:孔隙度权重为0.215 1,渗透率权重为0.139 8,压汞参数权重为0.107 6。

5) K均值聚类分类

根据研究区三叠系延长组下组合低渗透-致密储层的物性分布范围,本文将其分为4类进行评价。

3.2.3 分类结果和判别公式

4类储层数据间不存在截然分明的界限,但4类数据平均值存在显著差异,尤其体现在孔隙度与渗透率参数的有效区分上,从而实现了储层的合理分类评价(表5)。

对聚类分析的4分类结果,首先尝试采用Fisher判别法建立了判别方程(判别系数见表6)。然而,该判别方程对已分类储层进行再次分类的准确率仅为72.8%。此外,在实际应用中,由于部分井段缺乏压汞实验数据,该方程难以有效应用。

鉴于上述局限性,又尝试采用常用的储层分类评价方法——线性判别分析(LDA)。LDA输出的判别函数系数具有明确的物理意义(表7),可直接反映储层品质的主控因素,本质上是所有分类参数的线性多元回归。利用该判别方程对已分类储层进行回判,准确率达73.2%,优于Fisher判别法,但两者差异不大。

因此,转而采用储层物性参数(如孔隙度和渗透率)表征分类结果。这一调整不仅将回判准确率提升至82.5%,显著优于Fisher判别法和线性判别分析(LDA),更重要的是,由于绝大多数井虽缺乏压汞数据但普遍具备物性参数,采用物性参数表征方案显著提高了方法的普适性和实用性。

需要指出的是,聚类分析结果(图12)显示,尽管储层孔隙度与渗透率总体上呈正相关,但在划分的4类储层中,各类内部的孔隙度与渗透率均呈现负相

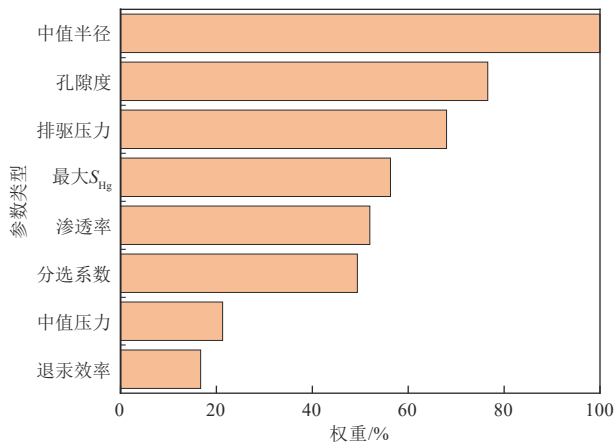


图11 鄂尔多斯盆地定边—富县地区全区二阶聚类权重赋值条形图

Fig. 11 Study-wide variable weight assignment for two-step cluster analysis for reservoirs in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin (S_{Hg} 为进汞饱和度。)

表4 鄂尔多斯盆地定边—富县地区影响因素权重判断矩阵

Table 4 Judgment matrix of influential factor weights for reservoirs in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

参数类型	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	分选系数	中值压力/MPa	中值半径/μm	排驱压力/MPa	最大S _{Hg} /%	退汞效率/%
孔隙度	1.00	1.54	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
渗透率	0.65	1.00	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
分选系数	0.50	0.77	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
中值压力	0.50	0.77	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
中值半径	0.50	0.77	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
排驱压力	0.50	0.77	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
最大S _{Hg}	0.50	0.77	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
退汞效率	0.50	0.77	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

注:S_{Hg}为进汞饱和度;表中数值为归一化数值。

表5 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长7—长9油层组储层分类数据

Table 5 Data on classification of reservoirs in the Chang 7-9 oil groups, Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

储层类型	特征值	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	分选系数	中值压力/MPa	中值半径/ μm	排驱压力/MPa	最大S _{Hg} /%	退汞效率/%
Ⅰ类	最大值	16.10	6.58	2.97	10.88	0.76	2.67	90.46	56.63
	最小值	10.90	0.30	0.08	1.02	0.07	0.11	72.26	18.86
	平均值	13.60	1.56	1.22	4.31	0.34	0.58	81.81	38.26
Ⅱ类	最大值	15.00	10.97	3.17	39.84	0.92	7.65	97.70	52.84
	最小值	6.40	0.06	0.05	0	0	0.11	42.59	0.10
	平均值	11.20	0.61	1.31	10.39	0.15	2.16	78.92	31.05
Ⅲ类	最大值	11.90	1.39	6.48	136.61	0.98	24.11	99.05	55.22
	最小值	3.00	0.01	0.05	0	0	0.12	14.96	3.66
	平均值	8.00	0.16	1.09	19.15	0.06	4.37	70.92	26.20
Ⅳ类	最大值	7.20	0.45	4.73	127.64	0.16	39.84	95.87	68.71
	最小值	2.10	0	0.08	0	0	0.51	11.52	3.66
	平均值	4.64	0.06	1.03	20.32	0.02	7.04	51.77	27.59

注:S_{Hg}为进汞饱和度。

表6 鄂尔多斯盆地定边—富县地区Fisher判别法判别函数系数

Table 6 Discriminant function coefficients of Fisher's method for reservoirs in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

参数类型	分类编号			
	1	2	3	4
孔隙度	6.328	4.652	2.881	1.375
渗透率	6.332	4.099	2.483	1.470
中值半径	21.904	7.830	0.769	-3.269
排驱压力/MPa	0.426	0.510	0.659	0.783
最大S _{Hg}	0.162	0.227	0.269	0.243
退汞效率	0.445	0.375	0.322	0.356
(常量)	-68.364	-44.636	-28.309	-18.535

注:S_{Hg}为进汞饱和度;表中数值为判别函数系数。

表7 鄂尔多斯盆地定边—富县地区线性判别法判别函数系数

Table 7 Discriminant function coefficients of linear discriminant analysis (LDA) for reservoirs in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

参数类型	分类编号			
	1	2	3	4
孔隙度	6.319	4.634	2.874	1.370
渗透率	6.071	3.848	2.269	1.243
分选系数	5.238	5.040	4.294	4.554
中值压力	-0.077	-0.084	-0.063	-0.064
中值半径	25.844	11.375	3.997	0.229
排驱压力	0.841	0.925	0.999	1.139
最大S _{Hg}	0.172	0.241	0.277	0.250
退汞效率	0.512	0.440	0.377	0.415
(常量)	-73.636	-49.589	-31.853	-22.505

注:S_{Hg}为进汞饱和度;表中数值为判别函数系数。

关关系。这符合储层分类评价的基本逻辑:当孔隙度或渗透率任一参数值较低时,另一方的高值可确保其在分类中获得合理的评价类别。

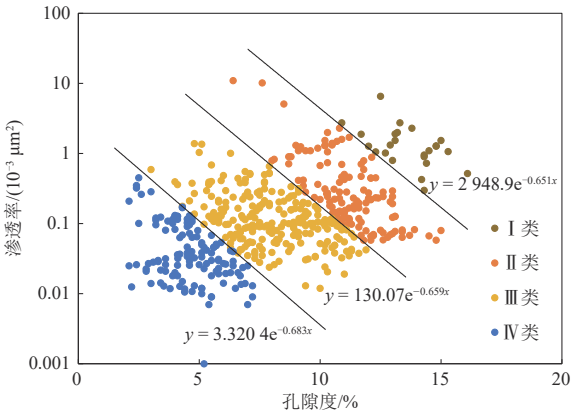


图12 鄂尔多斯盆地定边—富县地区低渗透-致密储层分类评价孔-渗交会图

Fig. 12 Porosity-permeability crossplot for the classification and evaluation of low-permeability tight reservoirs in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

聚类分析算法将研究区低渗透-致密砂岩储层划分为4类后,各类数据存在一定重叠区域。在数据重叠区域,依据数据分布情况和等分原则进行划分,建立拟合趋势线方程,并以此作为分类界限。因此,各类别之间的界限不再是传统分类中明确的孔隙度和渗透率数值,而是表现为界限方程。各类别之间的界线方程如下:

Ⅰ类和Ⅱ类的界线:

$$K = 2\,948.9\,e^{-0.651\Phi} \tag{4}$$

Ⅱ类和Ⅲ类的界线:

$$K = 130.07\,e^{-0.659\Phi} \tag{5}$$

Ⅲ类和Ⅳ类的界线:

$$K = 3.3204\,e^{-0.683\Phi} \tag{6}$$

式中:K为渗透率,10⁻³ μm²;Φ为孔隙度,%。

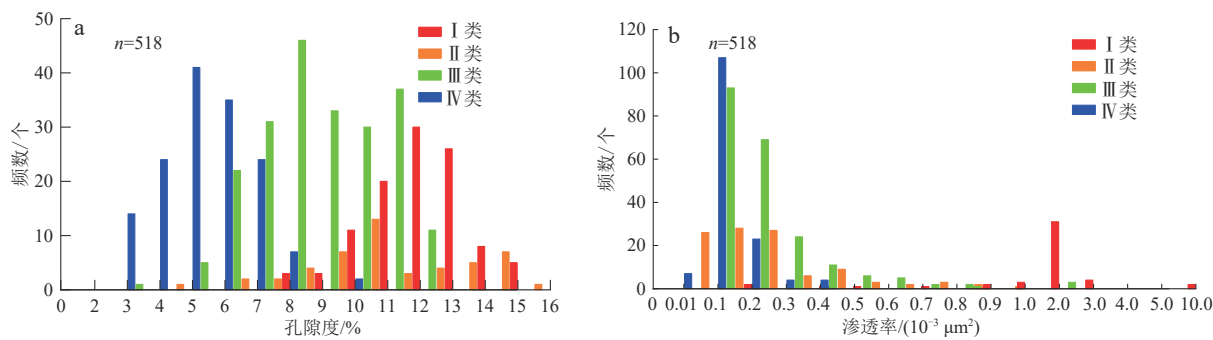


图 13 鄂尔多斯盆地定边—富县地区全区各类储层物性频数分布直方图

Fig. 13 Histograms showing the distributions of porosity and permeability of all types of reservoirs in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

a. 孔隙度;b. 渗透率
(n 为样品个数。)

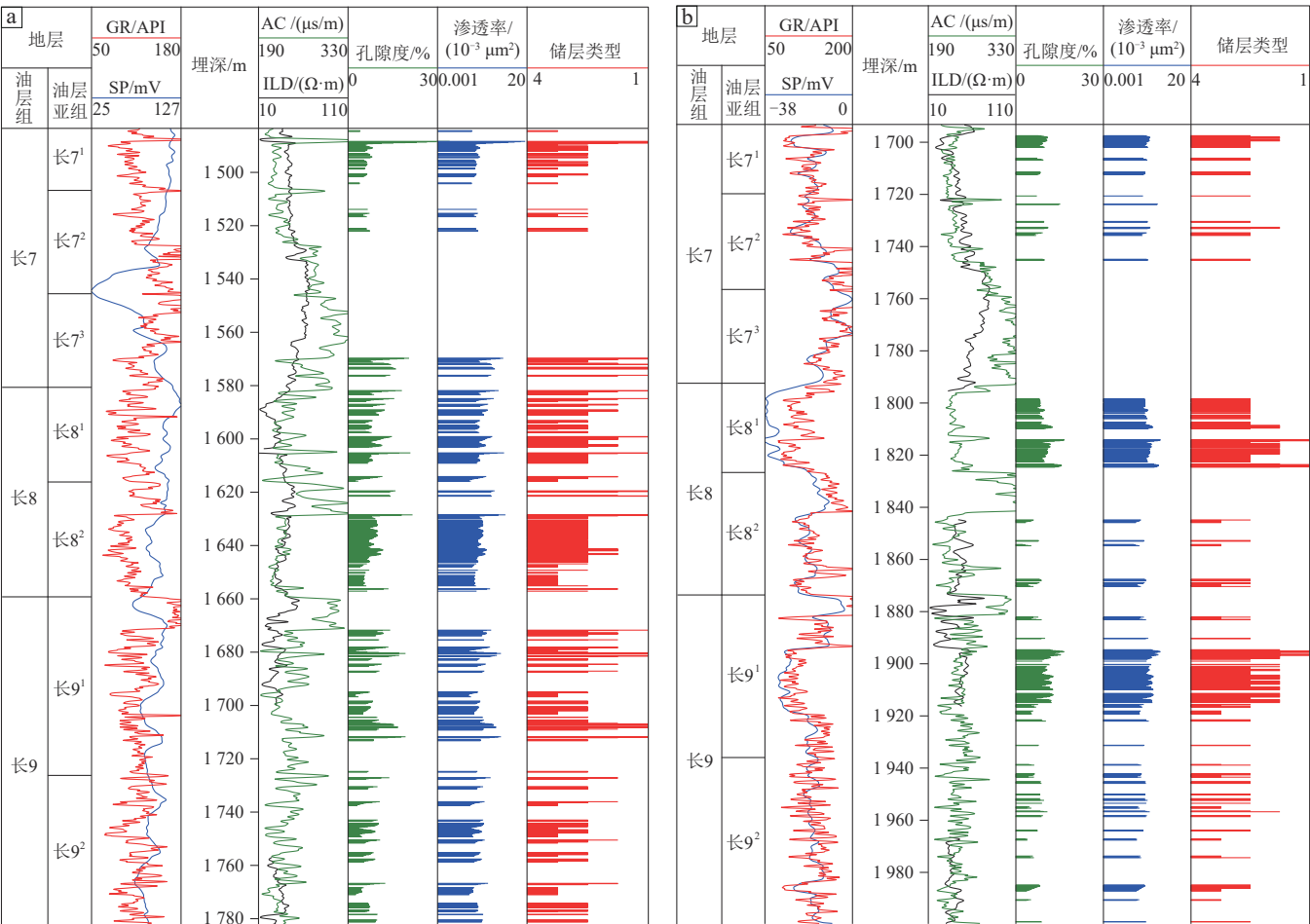


图 14 鄂尔多斯盆地定边—富县地区储层分类评价单井剖面

Fig. 14 Single-well profile for reservoir classification and evaluation in the Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

a. QT46井;b. LP172井
(储层类型为 4 类, 从 4 到 1 展示每一类的情况。)

将每个储层样点的孔隙度代入界线方程, 得出 3 个计算渗透率, 将评价目标的渗透率与 3 个计算渗透率比较, 即可得出其储层评价类别。

采用聚类分析进行储层分类评价, 由于采用包括

储层物性和孔隙结构等多参数进行储层评价分类, 同时又将评价结果用最易获得的储层物性参数进行表征, 从而避免了大多数多参数储层评价方法固有的参数获取难、不易推广应用的不足。相比之下, 本文提出

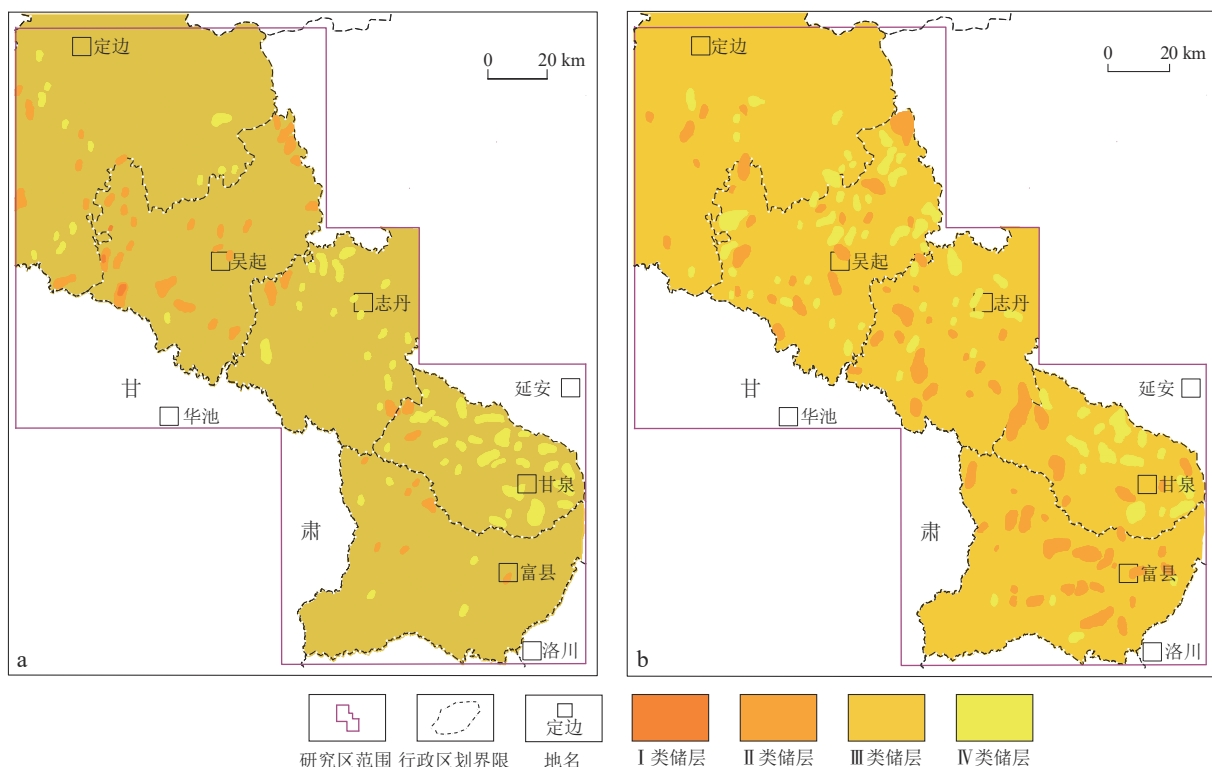


图15 鄂尔多斯盆地定边—富县地区长8油层组储层分类评价平面图

Fig. 15 Planar view of reservoir classification and evaluation of the Chang 8 oil group, Dingbian-Fuxian area, Ordos Basin

a. 长8¹油层组; b. 长8²油层组

的评价方法不仅较许多传统方法更加科学,而且相关参数获取难度小、成本低,简便实用,易于推广,尤其适用于低渗透-致密储层等复杂储层的分类评价。

3.3 储层分类评价方法应用

对储层分类结果进行统计分析,绘制不同储层类型的物性参数分布直方图(图13),定量表征其主体分布区间,为油田开发方案优化提供数据支撑。

根据以上标准,进行了研究区单井储层评价和全区储层评价,编制了主要目的层单井储层评价图(图14)和平面储层评价图(图15)。可以看出:同一口井纵向上储层品质差异很大,单砂体越厚的储层物性相对越好,评价级别越高。平面上由北东往西南方向储层品质逐渐变差,长8油层组储层整体以Ⅲ类储层为主,其次是Ⅳ类和Ⅱ类,Ⅰ类储层分布较少,储层平面非均质性较强,不同类型的储层交互分布。

4 结论

1) 聚类算法有K均值聚类、层次聚类和二阶聚类3种。对比结果表明,K均值聚类对于大量压汞和物性数据的处理能力优于系统聚类和二阶聚类,并能够对

数据赋以合理权重。故本文储层分类评价采用K均值聚类算法。

2) 本文提出的基于多参数聚类分析的储层分类评价方法,与以往多数储层分类评价方法不同,本方法首先综合运用反映储层物性和孔隙结构特征的8个主要参数(孔隙度、渗透率、分选系数、中值压力、中值半径、排驱压力、最大进汞饱和度和退汞效率)对储层进行分类评价,最终结果仅用最能反映储层品质、也最易获取的孔隙度和渗透率2个参数来进行表征,且各分类之间的界限并非以简单的“一刀切”式具体参数数值作为界限,而代之以界限数学函数来进行储层评价类型划分。具体做法是:首先通过聚类分析将研究区全部储层数据分为4类进行评价,并建立各界限的数学函数;再将每个评价目标的孔隙度值代入3个界限函数,得出相应的3个计算渗透率值;然后将评价目标的实际渗透率与界限渗透率计算值进行对比,即可获得评价目标的储层分类隶属。该评价方法不仅较许多传统方法更加科学,而且数据获取难度小、成本低,因而易于推广,简便实用,尤其适用于低渗透-致密储层等复杂储层的分类评价。

3) 运用本文提出的储层分类评价方法对研究区进行了单井储层评价和平面储层评价。所评价的长

8油层组储层整体以Ⅲ类储层为主,其次是Ⅳ类和Ⅱ类,Ⅰ类储层分布较少,储层平面非均质性较强。

参 考 文 献

- [1] 赵靖舟,吴少波,武富礼.论低渗透储层的分类与评价标准——以鄂尔多斯盆地为例[J].岩性油气藏,2007,19(3): 28-31, 53.
ZHAO Jingzhou, WU Shaobo, WU Fuli. The classification and evaluation criterion of low permeability reservoir: An example from Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(3): 28-31, 53.
- [2] 王建民.陕北顺宁油田长2~1低渗透砂岩储层综合分类评价[J].矿物岩石,2006,26(4): 89-94.
WANG Jianmin. Synthetically classification and evaluation of Chang 2~1 low permeability sandstone reservoirs in shunning oil field, north of Shaanxi Province[J]. Mineralogy and Petrology, 2006, 26(4): 89-94.
- [3] 闫新智,吴伟涛,赵靖舟,等.鄂尔多斯盆地中部罗庞塬地区长7储层控油性及其有利区评价[J].西安石油大学学报(自然科学版),2024,39(4): 10-19.
YAN Xinzhi, WU Weitao, ZHAO Jingzhou, et al. Study on control factors of oil distribution and favorable areas of Chang 7 in Luopangyuan area, central Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2024, 39(4): 10-19.
- [4] 李熙盛.强非均质性储层构型表征与流动单元智能分类评价[J].海洋地质前沿,2024,40(9): 28-37.
LI Xisheng. Characterization of strongly heterogeneous reservoir architecture and intelligent classification evaluation of flow units[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(9): 28-37.
- [5] 崔英敏,杨江宇,饶利平,等.基于神经网络模型的致密砂岩储层流动单元分类与评价——以鄂尔多斯盆地WQ北部长6油层组为例[J].西安石油大学学报(自然科学版),2024,39(2): 22-30.
CUI Yingmin, YANG Jiangyu, RAO Liping, et al. Classification and evaluation of flow units in tight sandstone reservoirs based on neural network model: A case study of Chang 6 oil reservoir in northern WQ area of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2024, 39(2): 22-30.
- [6] 孔星星,肖佃师,蒋恕,等.联合高压压汞和核磁共振分类评价致密砂岩储层——以鄂尔多斯盆地临兴区块为例[J].天然气工业,2020,40(3): 38-47.
KONG Xingxing, XIAO Dianshi, JIANG Shu, et al. Application of the combination of high-pressure mercury injection and nuclear magnetic resonance to the classification and evaluation of tight sandstone reservoirs: A case study of the Linxing Block in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 38-47.
- [7] 宋磊,宁正福,孙一丹,等.联合压汞法表征致密油储层孔隙结构[J].石油实验地质,2017,39(5): 700-705.
SONG Lei, NING Zhengfu, SUN Yidan, et al. Pore structure characterization of tight oil reservoirs by a combined mercury method[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(5): 700-705.
- [8] 王宏博,马存飞,曹铮,等.基于岩相的致密砂岩差异成岩作用及其储层物性响应——以准噶尔盆地莫西庄地区下侏罗统三工河组为例[J].石油与天然气地质,2023,44(4): 976-992.
WANG Hongbo, MA Cunfei, CAO Zheng, et al. Differential diagenesis and reservoir physical property responses of tight sandstone based on lithofacies: A case study on the Lower Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang area, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 976-992.
- [9] 许璟,葛云锦,贺永红,等.鄂尔多斯盆地延长探区长7油层组泥页岩孔隙结构定量表征与动态演化过程[J].石油与天然气地质,2023,44(2): 292-307.
XU Jing, GE Yunjin, HE Yonghong, et al. Quantitative characterization and dynamic evolution of pore structure in shale reservoirs of Chang 7 oil layer group in Yanchang area, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 292-307.
- [10] 唐海发,彭仕宓,赵彦超.大牛地气田盒2+3段致密砂岩储层微观孔隙结构特征及其分类评价[J].矿物岩石,2006,26(3): 107-113.
TANG Haifa, PENG Shimi, ZHAO Yanchao. Characteristics of pore structure and reservoir evaluation in H2+3 tight gas reservoir, Daniudi Gas Field[J]. Mineralogy and Petrology, 2006, 26(3): 107-113.
- [11] 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 Haiyan, YUE Dali, ZHANG Xiujuan. Characteristics of pore structure and reservoir evaluation of low permeability reservoir in Sulige Gas Field[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 133-140.
- [12] 黄龙,田景春,肖玲,等.鄂尔多斯盆地富县地区长6砂岩储层特征及评价[J].岩性油气藏,2008,20(1): 83-88.
HUANG Long, TIAN Jingchun, XIAO Ling, et al. Characteristics and evaluation of Chang 6 sandstone reservoir of Upper Triassic in Fuxian area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2008, 20(1): 83-88.
- [13] 曾溅辉,张亚雄,张在振,等.致密砂岩气藏复杂气-水关系形成和分布主控因素及分布模式[J].石油与天然气地质,2023,44(5): 1067-1083.
ZENG Jianhui, ZHANG Yaxiong, ZHANG Zaizhen, et al. Complex gas-water contacts in tight sandstone gas reservoirs: Distribution pattern and dominant factors controlling their formation and distribution[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1067-1083.
- [14] 刘明熹,宋考平,郭平,等.基于聚类分析的砾岩储层分类方法及应用[J].特种油气藏,2023,30(6): 16-22.
LIU Mingxi, SONG Kaoping, GUO Ping, et al. Classification method and application of conglomerate reservoir based on clustering analysis[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(6): 16-22.
- [15] LIU Junlong, ZHANG Xiangchun. Quantitative characterization

- of permeability heterogeneity of tight-sand reservoirs using nano-CT technology: A case study of the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Energy Geoscience*, 2025, 6(2): 100388.
- [16] 张家强, 李士祥, 李宏伟, 等. 鄂尔多斯盆地延长组7油层组湖盆远端重力流沉积与深水油气勘探——以城页水平井区长7₃小层为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(5): 570–587.
- ZHANG Jiaqiang, LI Shixiang, LI Hongwei, et al. Gravity flow deposits in the distal lacustrine basin of the 7th reservoir group of Yanchang Formation and deepwater oil and gas exploration in Ordos Basin: A case study of Chang 7₃ sublayer of Chengye horizontal well region[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(5): 570–587.
- [17] LI Qihui, REN Dazhong, WANG Hu, et al. Microscopic characteristics of tight sandstone reservoirs and their effects on the imbibition efficiency of fracturing fluids: A case study of the Linxing area, Ordos Basin[J]. *Energy Geoscience*, 2024, 5(3): 100302.
- [18] AMAEFULE J O, ALTUNBAY M, TIAB D, et al. Enhanced reservoir description: Using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 1993. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1993: SPE-26436-MS.
- [19] EBANKS W J Jr. Flow unit concept-integrated approach to reservoir description for engineering projects[J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(5): 551–552.
- [20] 吴胜和, 王仲林. 陆相储层流动单元研究的新思路[J]. *沉积学报*, 1999, 17(2): 252–257.
- WU Shenghe, WANG Zhonglin. A new method of non-marine reservoir flow unit study[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(2): 252–257.
- [21] 万琼华, 吴胜和, 陈亮, 等. 基于深水浊积水道构型的流动单元分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 306–313.
- WAN Qionghua, WU Shenghe, CHEN Liang, et al. Analysis of flow unit distribution based on architecture of deep-water turbidite channel systems [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 306–313.
- [22] 李阳. 储层流动单元模式及剩余油分布规律[J]. *石油学报*, 2003, 24(3): 52–55.
- LI Yang. Flow unit mode and remaining oil distribution in reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(3): 52–55.
- [23] 魏斌, 陈建文, 郑浚茂, 等. 应用储层流动单元研究高含水油田剩余油分布[J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 403–410.
- WEI Bin, CHEN Jianwen, ZHENG Junmao, et al. Utilization of reservoir flow unit to study remaining oil distribution in high water containing oilfield [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 403–410.
- [24] CANAS J A, MALIK Z A, WU C H. Characterization of flow units in sandstone reservoirs: La Cira Field, Colombia, South America [C]//Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, 1994. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 1994: SPE-27732-MS.
- [25] 尹太举, 张昌民, 陈程, 等. 建立储层流动单元模型的新方法[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(2): 170–175.
- YIN Taiju, ZHANG Changmin, CHEN Cheng, et al. A new method for founding the model of flow unit reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(2): 170–175.
- [26] 彭仕宓, 周恒涛, 李海燕, 等. 分阶段流动单元模型的建立及剩余油预测——以别古庄油田京11断块为例[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(2): 216–221, 251.
- PENG Shimi, ZHOU Hengtao, LI Haiyan, et al. Phased flow unit model establishment and remaining oil prediction: An example from Jing 11 block in Bieguzhuang Oilfield [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(2): 216–221, 251.
- [27] 彭仕宓, 尹志军, 常学军, 等. 陆相储集层流动单元定量研究新方法[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(5): 68–70.
- PENG Shimi, YIN Zhijun, CHANG Xuejun, et al. A new quantitative method to study flow unit of non-marine reservoir [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(5): 68–70.
- [28] 陈烨菲, 彭仕宓, 宋桂茹. 流动单元的井间预测及剩余油分布规律研究[J]. *石油学报*, 2003, 24(3): 74–77.
- CHEN Yefei, PENG Shimi, SONG Guiru. Inter-well prediction of flow units and remaining oil distribution [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(3): 74–77.
- [29] 靳彦欣, 林承焰, 赵丽, 等. 关于用FZI划分流动单元的探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2004, 31(5): 130–132.
- JIN Yanxin, LIN Chengyan, ZHAO Li, et al. Discussions on FZI methodology in flow unit identification and discrimination [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(5): 130–132.
- [30] JAIN A K. Data clustering: 50 years beyond K-means[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(8): 651–666.
- [31] 吕明针, 林承焰, 张宪国, 等. 储层流动单元划分方法评价及优选[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(1): 74–80, 88.
- LYU Mingzhen, LIN Chengyan, ZHANG Xianguo, et al. Evaluation and optimization of flow unit division methods [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(1): 74–80, 88.

(编辑 刘格云)