

向后筛选策略在鄂尔多斯盆地三叠系延长组储层微观非均质性评价中的应用

南凡驰^{1,2}, 林良彪^{1,2}, 余瑜^{1,2}, 陈朝兵^{3,4}, 慕尚超⁵, 王泓波⁶, 姬冠华⁶, 马俊民⁶

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 3. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 4. 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 5. 中国石化 西北分公司 采油一厂, 新疆 乌鲁木齐 830011; 6. 中国石油 长庆油田分公司 第二采气厂, 陕西 榆林 719000)

摘要:鄂尔多斯盆地华庆地区三叠系延长组6段(长6段)和合水地区长8段储层成岩作用改造强烈,孔喉结构复杂,微观非均质性强。为更好地定量表征储层微观非均质性,对前人提出的储层微观非均质性评价参数进行了重新厘定。采用向后筛选策略,针对华庆地区长6段储层利用前人提出的相关参数建立回归方程,提出综合评价参数 N ,针对合水地区长8段储层利用高压压汞相关参数建立回归方程,提出参数 G_k 和 G_s ,定量综合评价储层微观非均质性,同时验证向后筛选策略在解决地质问题上的可行性。结果表明:综合评价参数 N 与渗透率具有较好的相关性,将储层微观非均质性分为强、中等、弱,相关系数分别为0.9812、0.9496和0.7724, G_k 与孔隙度、 G_s 与渗透率也都呈现较好的相关性。3个综合评价参数较单一评价因素相关性均有明显提高,说明向后筛选策略在储层微观非均质性定量评价方面取得了较好的结果,表明数学方法可以为相关地质问题的解决提供新的途径。

关键词:定量表征;微观非均质性;向后筛选策略;储层定量评价;延长组;合水地区;华庆地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Application of backward elimination procedure in evaluation of microscopic reservoir heterogeneity in Chang 6 Member, Ordos Basin

Nan Fanchi^{1,2}, Lin Liangbiao^{1,2}, Yu Yu^{1,2}, Chen Zhaobing^{3,4}, Mu Shangchao⁵, Wang Hongbo⁶, Ji Guanhua⁶, Ma Junmin⁶

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 3. College of Earth Sciences & Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065; 4. Provincial Key Lab of Hydrocarbon Accumulation Geology of Shaanxi, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 5. No. 1 Production Plant of Northwest Branch, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 6. No. 2 Gas Production Plant of Changqing Oilfield, PetroChina, Yulin, Shaanxi 719000, China)

Abstract: The sixth and eighth members of Yanchang Formation (Chang 6 Member in Huaqing area and Chang 8 Member in Heshui area), Ordos Basin, feature complex pore-throat structure and strong micro-heterogeneity under strong diagenetic transformation. The study re-defines evaluation parameters of the microscopic reservoir heterogeneity proposed by predecessors to better quantitatively characterize the microscopic heterogeneity of the reservoir. The backward elimination procedure is adopted to establish a regression equation for the Chang 6 reservoir in Huaqing area using relevant parameters proposed by the predecessors, with N , a parameter for comprehensive evaluation, proposed. Meanwhile, another regression equation is set for the Chang 8 reservoir in Heshui area using the parameters related to high-pressure mercury intrusion, with parameters G_k and G_s proposed, to make quantitative and comprehensive evaluation of the microscopic reservoir heterogeneity while verifying the feasibility of backward elimination in solving geological problems. The results show that parameter N is in good correlation with permeability, and the reservoir can be divided into three sections according to microscopic heterogeneity: strong, medium and weak sections, with correlation coefficients of 0.9812, 0.9496 and 0.7724, respectively. Besides, parameter G_k and porosity, as well as parameter G_s

收稿日期:2022-01-20;修订日期:2022-07-16。

第一作者简介:南凡驰(1994—),男,博士研究生,沉积与储层地质学。E-mail: 1625417008@qq.com。

通讯作者简介:林良彪(1979—),男,教授,沉积学与储层地质学。E-mail: linliangbiao08@cdut.cn。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05050006)。

and permeability are also in good correlation. The correlation of the three comprehensive evaluation parameters is significantly higher than that of a single evaluation factor, indicating that backward elimination has achieved relatively ideal results in the quantitative evaluation of microscopic reservoir heterogeneity, and the mathematical method can provide new ideas for solving geological problems related.

Key words: quantitative characterization, microscopic heterogeneity, backward elimination, reservoir quantitative evaluation, Yanchang Formation, Heshui area, Huaqing area, Ordos Basin

引用格式:南凡驰,林良彪,余瑜,等. 向后筛选策略在鄂尔多斯盆地三叠系延长组储层微观非均质性评价中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1155–1166. DOI: 10. 11743/ogg20220512.

Nan Fanchi, Lin Liangbiao, Yu Yu, et al. Application of backward elimination procedure in evaluation of microscopic reservoir heterogeneity in Chang 6 Member, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1155–1166. DOI: 10. 11743/ogg20220512.

储层微观非均质性是指储层填隙物类型、数量分布、孔隙结构、孔喉分布特征以及裂缝发育情况等微观特征的变化^[1],通常从成岩程度、矿物成分、分选系数和胶结物含量等方面来进行表征。储层微观非均质性对于孔喉连通性、结构表征、油气富集能力、储层评价等方面研究具有重要意义,许多专家学者对此做了大量探索和研究工作^[2-6]。总结前人研究成果,目前关于储层微观非均质性的研究方法主要有3种:①基于铸体薄片数据,以样品中的矿物含量、胶结物含量、面孔率、易溶矿物含量等为切入点,建立相应的评价参数来定量评价储层微观非均质性^[7-9],如曹江骏提出的胶结溶蚀指数和成岩综合指数^[10-11],陈朝兵提出的充填指数和抗溶蚀指数^[12]。②基于高压压汞和恒速压汞等实验获得的可以表征储层相关性质的参数来进行定量评价^[7]。其中,高压压汞实验在储层孔喉结构表征方面可行性较高、成本较低且应用比较成熟,前人基于高压压汞实验相关参数也提出了一些非均质性评价标准^[13-14],如臧士宾基于高压压汞相关参数和曲线形态提出了均质系数和主要流动空间百分数^[13]。③基于学科交叉并在实验分析的基础上,结合神经网络和Matlab等数学方法或者编程来定量评价储层的微观非均质性^[15-16]。王卫红利用BP神经网络、多项Logistic回归、融合评价方法对储层非均质性进行评价^[15];卢晨刚利用Matlab编程,提出铸体薄片提取面孔率的新方法,进而提出非均质指数 U 来定量评价储层非均质性^[16]。

虽然前人对储层微观非均质性定量表征做过大量研究,提出了众多的参数,但大都集中在用一种参数或从一种角度出发对非均质性进行定量评价,将诸多因素综合起来评价储层微观非均质性的研究较少,或者提出的方案太过复杂,在生产实践中操作难度较大。基于此,本文以鄂尔多斯盆地华庆地区三叠系延长组6段(长6段)和合水地区长8段为例,以前人提出的储层微观非均质性定量评价参数和高压压汞数据为基

础,利用向后筛选策略分别对两种储层进行综合评价参数的提取。以此提出综合性更强、更全面、更准确的储层微观非均质性定量评价参数,同时论证数学方法在解决地质问题上的可行性。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[17],伊陕斜坡是鄂尔多斯盆地内分布范围最广的构造单元,位于盆地中部,内部构造作用比较弱。华庆地区和合水地区位于伊陕斜坡的西南部(图1),发育有大量的东西向鼻状隆起^[18]。鄂尔多斯盆地上三叠统延长组自下而上

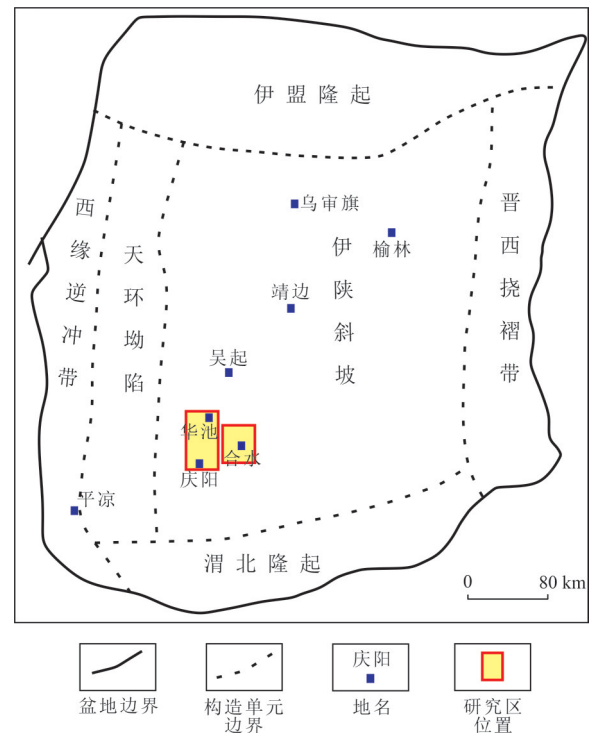


图1 华庆地区和合水地区构造位置

Fig. 1 Map showing the structural locations of Huaqing and Heshui areas

可分为长10段—长1段。在长10段—长1段沉积期,内陆湖盆演化阶段经历了湖盆扩张—缩小—消亡的水进—水退过程^[19]。长8段沉积期(长8期)湖盆继续扩张,但长8中期—末期湖盆经历了先缩减而后继续扩张的发育阶段,因此在长8中期—末期,三角洲体系相对发育,砂体沉积厚度大^[20]。湖盆缩减阶段主要发生在长6—长4+5期,长6期为湖盆开始萎缩的早期阶段,湖盆中心(包括华庆地区)仍处于三角洲—湖泊环境,砂体沉积规模大,形成了有利的油气储集体^[21-23]。

2 储层特征

2.1 岩石学特征

根据Folk的砂岩分类标准^[24],华庆地区长6段储

层(长6储层)岩性主要为浅灰色、灰褐色岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩,其次为岩屑砂岩、石英砂岩和长石砂岩。合水地区长8储层岩性主要为浅灰色、灰褐色长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩(图2)。

华庆地区长6储层碎屑颗粒以次棱角状为主,分选中等—好,成分成熟度差—中等,接触方式以点—线接触为主。胶结物类型以孔隙式胶结和加大孔隙式胶结为主,还包括少量薄膜—孔隙、孔隙—基底、压嵌—孔隙式胶结。合水地区长8储层颗粒接触方式以线接触为主,其次为点—线接触、点接触,凹—凸接触(占1.70%)与缝合线接触(占0.80%)发育极少。碎屑颗粒磨圆以次棱角状为主(占91.58%)。分选中等—好,成分成熟度差—中等。胶结物类型以孔隙式胶结和加大孔隙式胶结为主,还包括少量薄膜—孔隙、孔隙—基底、压嵌—孔隙式胶结。

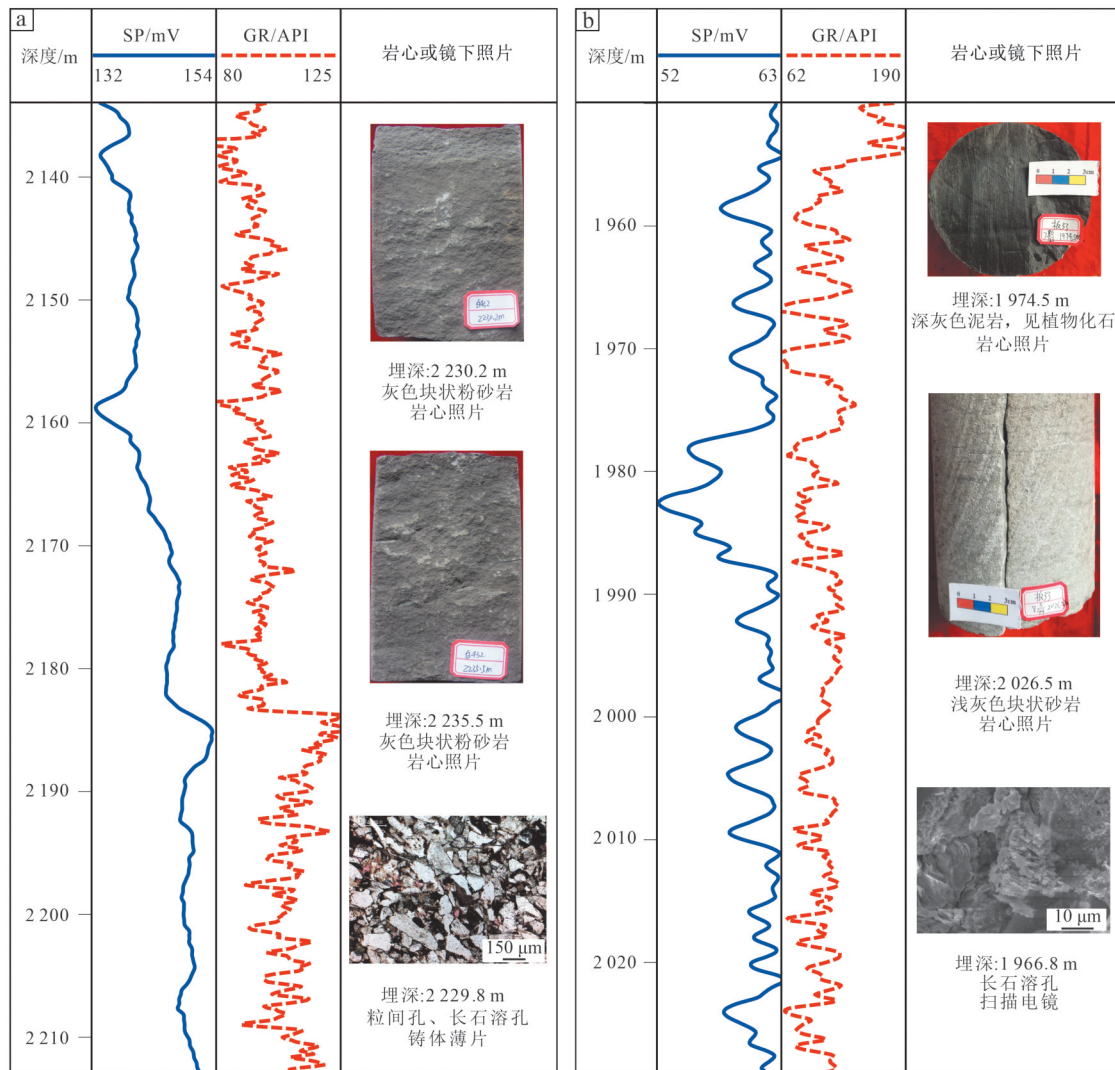


图2 鄂尔多斯盆地长6和长8储层测井曲线及岩心特征

Fig. 2 Logging curves and core photos showing the characteristics of Chang 6 and 8 reservoirs, Ordos Basin

a. 华庆地区, B4232井, 长6; b. 合水地区, B33井, 长8

华庆地区长6储层孔隙类型主要包括粒间孔、溶蚀孔、晶间微孔和微裂隙(图3)。其中粒间孔体积分数主要分布在0~15.00%,平均体积分数为1.52%;溶蚀孔主要包括粒间溶孔、长石溶孔和岩屑溶孔,其中粒间溶孔体积分数较小,分布在0~3.00%,平均体积分数为0.07%,长石溶孔体积分数的分布范围较大,分布在0~6.20%,平均体积分数为0.66%;岩屑溶孔体积分数主要分布在0~2.00%,平均体积分数为0.12%。

合水地区长8储层平均面孔率为2.56%,孔隙类型主要包括粒间孔、溶蚀孔、晶间孔和微裂隙。其中

粒间孔平均体积分数为1.57%,溶蚀孔主要包括粒间溶孔、长石溶孔和岩屑溶孔,其中粒间溶孔体积分数较小,平均体积分数为0.05%;长石溶孔体积分数较大,平均体积分数为0.86%;岩屑溶孔平均体积分数为0.79%。

受成岩作用影响,华庆地区长6储层和合水地区长8储层还发育有少量成岩缝(图3)。

2.2 孔喉结构特征

在高压压汞毛管压力数据的基础上,计算储层孔喉半径和进汞梯度,绘制储层孔喉半径分布图(图4a,

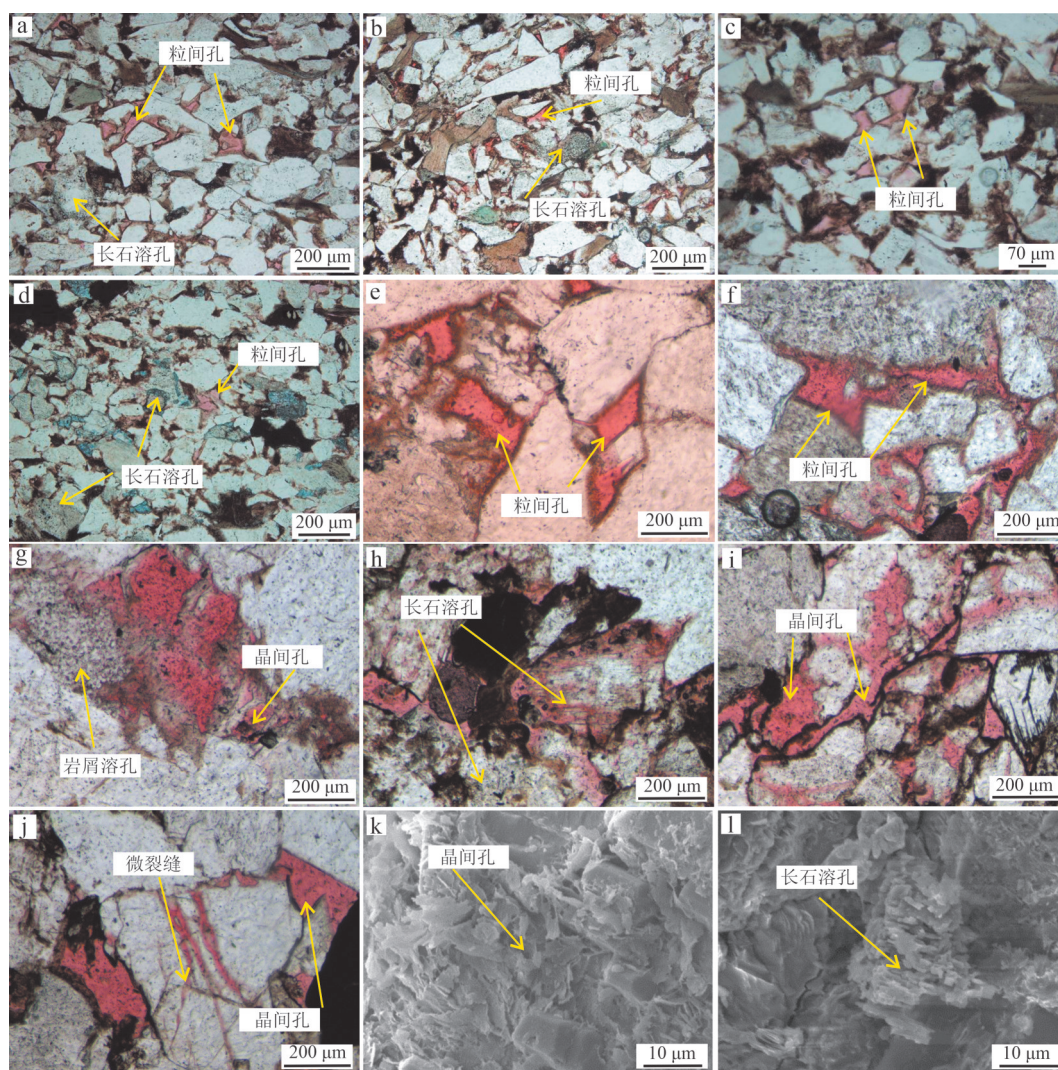


图3 华庆地区长6储层和合水地区长8储层孔隙类型镜下特征照片

Fig. 3 Thin section images showing the microscopic characteristics of pores in diverse types in the Chang 6 and 8 reservoirs in Huaqing and Heshui areas, respectively

a. 白224井,埋深2 256.5 m,长6,粒间孔、溶孔,铸体薄片; b. 白231井,埋深2 241.0 m,长6,残余孔、溶孔,铸体薄片; c. 白239井,埋深2 096.3 m,长6,粒间孔,铸体薄片; d. 白278井,埋深1 895.8 m,长6,溶孔粒间孔,铸体薄片; e. 宁146井,埋深1 817.2 m,长8,粒间孔,绿泥石膜及自生石英,铸体薄片; f. 宁167井,埋深1 637.2 m,长8,粒间孔及绿泥石膜,铸体薄片; g. 庆91井,埋深2 090.2 m,长8,岩屑溶孔及高岭石晶间孔,铸体薄片; h. 西177井,埋深1 979.1 m,长8,发育的长石溶孔,铸体薄片; i. 悦48井,埋深2 158.8 m,长8,粒间孔及溶孔,铸体薄片; j. 庄237井,埋深1 890.7 m,长8,成岩缝及粒间孔,铸体薄片; k. 蔡12井,埋深2 118.3 m,长8,晶间孔,扫描电镜; l. 板33井,埋深1 966.8 m,长8,长石溶孔,扫描电镜

b)。华庆地区长6储层孔喉半径存在两个峰值,主要分布在 $0.01 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 和 $0.08 \sim 0.20 \mu\text{m}$ 两个区间;合水地区长8储层孔喉半径存在一个峰值,主要分布在 $0.08 \sim 0.30 \mu\text{m}$ 。

华庆地区长6储层孔隙度均值为9.6%,合水地区长8储层孔隙度均值为10.9%;这两套储层的渗透率都主要分布在小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的区间,只有少量样品的渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。华庆地区长6储层样品的渗透率较合水地区长8储层更多地分布在小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的区间,而在渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的区间,合水地区长8储层则分布更多(图4c,d)。

3 综合评价参数的提出

向后筛选策略是变量不断被剔除出回归方程,并对剩余变量再次进行检验,以此反复,直到确定最优参数组合并建立回归方程的过程。本文主要基于薄片、扫描电镜、高压压汞等实验手段获得储层的岩石矿物成分、孔隙类型、毛管压力和汞饱和度等数据,利用

SPSS软件,提出相关参数用于对储层微观非均质性进行定量表征。对于华庆地区长6储层,利用相关数据,对前人提出的储层微观非均质性定量评价参数进行厘定;之后利用SPSS软件对各参数进行因子分析,优选出能够较好反映储层微观非均质性的参数;最后采用向后筛选策略,建立回归方程,确定综合评价参数以定量表征储层微观非均质性。对于合水地区长8储层,则利用高压压汞参数采用向后筛选策略分别对渗透率和孔隙度建立回归方程,确定综合评价参数以定量表征储层微观非均质性。

3.1 长6储层回归方程的建立

在前人对储层微观非均质性评价的基础上,对现有部分参数的计算公式进行了统计(表1)。通过SPSS软件对9个参数与孔隙度和渗透率的相关性开展研究,可以给出检验统计量的值落在不同分布中的概率值 P (无量纲),若显著性水平(α)为0.05,当 $P \leq 0.05$,则认为非均质性参数对孔隙度和渗透率产生了显著影响。以Pearson相关性和显著性(双侧)概率 P 值作为标准,

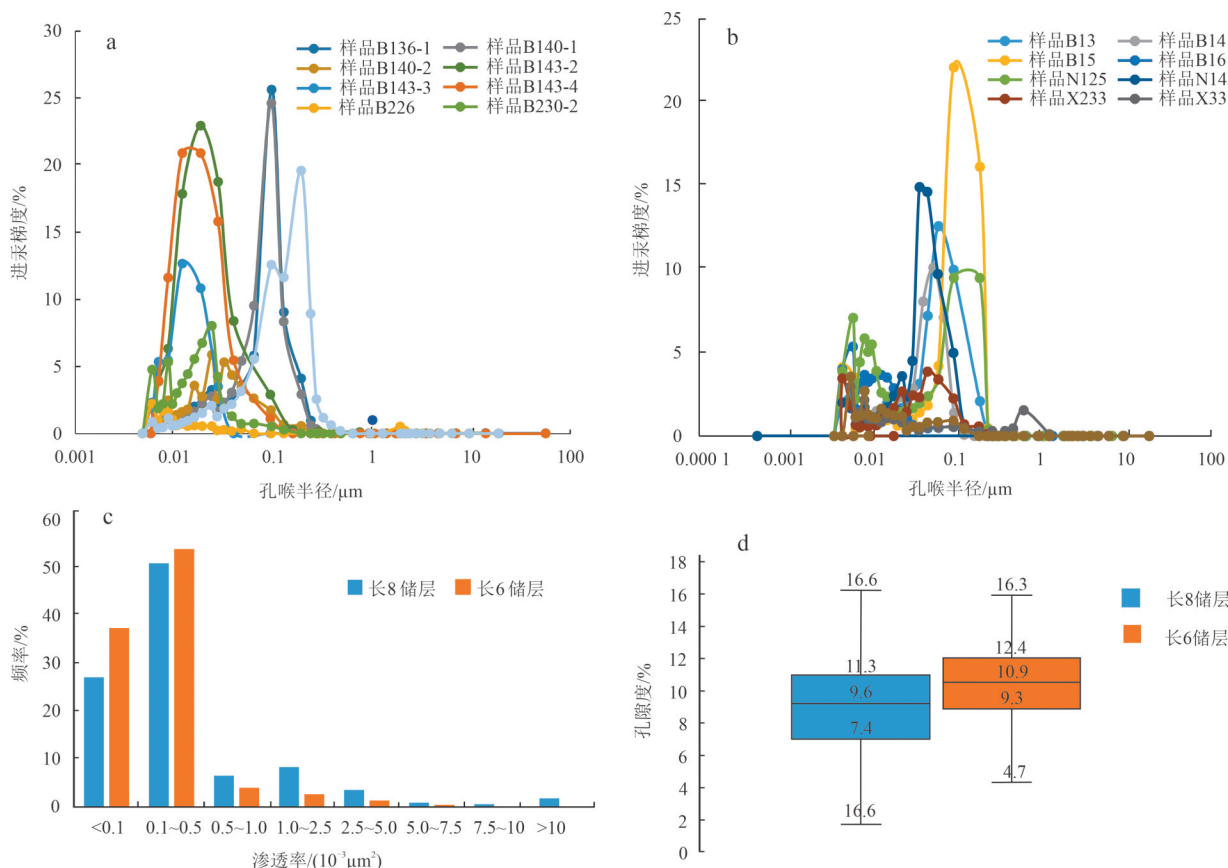


图4 华庆地区长6储层和合水地区长8储层孔喉半径及物性分布

Fig. 4 Map showing distributions of pore throat radius, porosity and permeability of the Chang 6 and 8 reservoirs in Huaqing and Heshui areas, respectively

a. 华庆地区长6储层孔喉分布; b. 合水地区长8储层孔喉分布; c. 长6和长8储层渗透率分布柱状图; d. 长6和长8储层孔隙度分布箱状图

表1 储层微观非均质性评价方法参数统计
Table 1 Statistics of parameters for microscopic reservoir heterogeneity evaluation

表征参数	获取途径/计算公式	参考文献
排驱压力	高压压汞实验	吴小斌 ^[26]
中值压力	高压压汞实验	吴小斌 ^[26]
分选系数	高压压汞实验	林伶 ^[14]
颗粒非均质性	$\beta = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max}}$	董利飞 ^[9]
胶结溶蚀指数	胶结溶蚀指数=胶结指数×溶蚀指数	曹江骏 ^[10]
	胶结指数=胶结物体积分数/(胶结物体积分数+粒间孔体积分数)	
	溶蚀指数=易溶矿物体积分数/(易溶矿物体积分数+溶蚀孔体积分数)	
成岩综合指数	成岩综合指数=(总面孔率×100%)/(压实率+胶结率+微孔率+反溶蚀率)	曹江骏 ^[11]
	压实率 = $(\Phi_1 - \Phi_2)/\Phi_1 \times 100\%$	
	胶结率 = $W/(W + P_1) \times 100\%$	
	微孔率 = $P_2/P_M \times 100\%$	
充填指数	反溶蚀率 = $1 - P_3/P_T \times 100\%$	陈朝兵 ^[12]
	填隙物充填指数=填隙物含量/(填隙物含量+剩余粒间孔含量)	
抗溶蚀指数	抗溶蚀指数=易溶颗粒含量/(易溶颗粒含量+易溶颗粒溶孔含量)	陈朝兵 ^[12]
成岩综合指数	成岩综合指数=(面孔率×100%)/(视压实率+视胶结率+视微孔率)	单祥 ^[3]

注: β 为颗粒非均值系数,无量纲; $D_{\max}$ 和 $D_{\min}$ 分别为薄片粒度中最大值和最小值, μm ; Φ_1 为原始孔隙度,%; Φ_2 为压实后剩余孔隙度,%; W 为胶结物总含量,%; P_1 为剩余粒间孔面孔率,%; P_2 为微孔面孔率,%; P_M 为实测孔隙度,%; P_3 为溶蚀孔面孔率,%; P_T 为总面孔率,%。

对已有表征储层非均质性的参数进行厘定,认为同时满足在0.01水平(双侧)上显著相关和概率 $P \leq 0.05$ 的参数与储层非均质性有较强的相关性。筛选出中值压力、分选系数、颗粒非均质性、胶结溶蚀指数、成岩综合指数、充填指数和抗溶蚀指数等7个参数(表2)。

在数据分析中,一个样本通常会用很多变量来描述,而且这些变量之间往往存在某种联系,如储层微观非均质性定量评价通常包括填隙物含量、碎屑颗粒成分、成岩作用等多种参数。因子分析就是要找出各变量之间的联系,进而减少变量个数,是降维所采用的主要方法之一。在减少变量的同时,又不会有大量信息的丢失,有利于对多维数据的理解^[25-27]。

因子分析产生的碎石图的理想模型是Cattell在1966年提出来的^[28]。它是由几段折线组合而成,从头到尾,折线不同部位的曲率逐渐降低,一般保留曲线在开始变陡之前的那些因子^[29-30]。碎石图解方法以特征值为纵轴,成分为横轴,将每个成分所解释的方差按照

表2 华庆地区长6储层微观非均质性评价参数与孔隙度、渗透率相关性

Table 2 Correlation between parameters of microscopic reservoir heterogeneity evaluation and porosity, permeability of the Chang 6 reservoir in Huaqing area

参数	孔隙度		渗透率	
	Pearson相关性	显著性(双侧)	Pearson相关性	显著性(双侧)
排驱压力	-0.690**	0	-0.233	0.115
中值压力	-0.511**	0.001	-0.537**	0
分选系数	0.339*	0.020	0.456**	0.001
颗粒非均质性	-0.604**	0	-0.604**	0
胶结溶蚀指数	-0.600**	0	-0.514**	0
成岩综合指数(曹江骏)	0.755**	0	0.709**	0
充填指数	-0.712**	0	-0.721**	0
抗溶蚀指数	-0.711**	0	-0.775**	0
成岩综合指数(单祥)	-0.076	0.719	-0.006	0.979

注: **是指 α 在0.01条件下(双侧)显著相关; *是指 α 在0.05条件下(双侧)显著相关。

从大到小的顺序排列起来,显著性下降或产生断裂的“拐点”点,称之为曲线的“肘”。利用碎石图可以直观评估保留的因素包含的原始信息量。也就是说,前面陡峭的部分说明特征值大,包含的信息多,后面平坦的部分意味着特征值小^[31-38]。华庆地区长6储层孔隙度和渗透率碎石图显示,当评价参数分别为2,3,4个时,曲线均发生明显的转折(图5),说明主成分个数为2,3,4个时,均能对储层孔隙度和渗透率进行较好的评价。

为了明确不同数量的参数组合对非均质性的影响,同时考虑到影响储层非均质性的因素包括碎屑颗粒大小、分选性、成岩程度、胶结物含量及类型等,以7个参数为一组,利用向后筛选策略经过6步完成回归方程的建立,在此过程中建立了6个回归模型,最终方程为第六个模型。在向后筛选的过程中,分选系数、颗粒非均质性、中值压力、胶结溶蚀指数、成岩综合指数的概率 P 值远大于0.05,软件从模型中剔除这5个参数,剩余2个参数。

线性回归中的相关系数 R^2 (无量纲)可以表征回归直线对观测值的拟合程度,衡量的是预测值对真值的拟合程度,其值越接近1越好。随着筛选的进行,标准估计误差逐渐减小,调整的 R^2 逐渐增大,第六次标准估计的误差最小。向后筛选策略是变量不断被软件剔除出回归方程的过程,通过SPSS软件自动完成相关变量的选择,最后建立回归模型^[39-40]。首先,所有变量全部引入回归方程,并对回归方程进行各种检验。然后,在回归系数显著性检验不显著

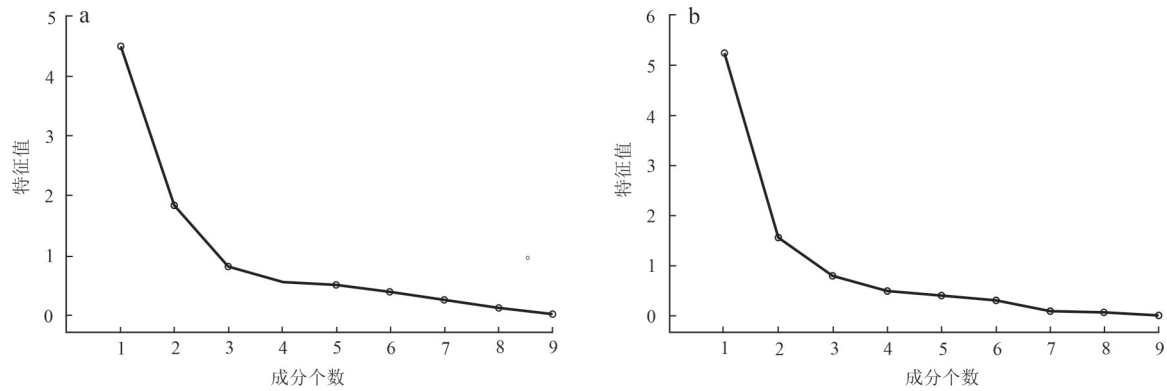


图5 华庆地区长6储层孔隙度和渗透率碎石图

Fig. 5 Scree plot showing the porosity and permeability of Chang 6 reservoir in Huaqing area

a. 孔隙度; b. 渗透率

表3 华庆地区长6储层各回归模型中各参数对应系数统计

Table 3 Statistics of parameter coefficients in each regression model of Chang 6 reservoir in Huaqing area

参数	回归模型					
	1	2	3	4	5	6
常量	0.866	0.877	1.135	1.119	1.149	1.328
中值压力	-0.002	-0.002	0	—	—	—
分选系数	-0.012	—	—	—	—	—
颗粒非均质性	0.317	0.283	—	—	—	—
胶结溶蚀指数	0.234	0.201	0.113	0.097	—	—
成岩综合指数	0.052	0.045	0.029	0.038	0.039	—
填隙物充填指数C	-0.303	-0.298	-0.312	-0.303	-0.287	-0.356
抗溶蚀指数K	-1.053	-1.021	-0.962	-0.957	-0.911	-0.994

注:表中的“—”为剔除的变量。

的一个或多个变量中,剔除t检验值最小的变量,并重新建立回归方程和进行各种检验。以此类推,对导入的参数全部进行检验,最后,若新建回归方程中所有变量的回归系数检验都显著,则回归方程建立结束。从用向后筛选策略建立方程的过程看,随着解释变量的不断减少,回归方程的拟合优度不断提高^[41-45]。

利用向后筛选策略共经过6步完成回归方程的建立,依次剔除不显著的变量,保留常量、填隙物充填指数C(无量纲)和抗溶蚀指数K(无量纲)。这与前文碎石图所表征的参数个数相对应。各方程系数如表3示,最终选择模型6对储层微观非均质性进行综合评价,评价方程为:

$$N = 1.328 - 0.356C - 0.994K \quad (1)$$

式中:N为储层微观非均质性综合定量评价参数,无量纲。

利用生成的综合评价指数N与长6储层渗透率做相关性分析,相关系数为0.947,两者为显著相关,相关性较单个参数评价储层微观非均质性明显提高,说

明与单个参数比,综合评价指数N对储层渗透率具有更好的评价意义。

3.2 长8储层回归方程的建立

利用SPSS软件对高压压汞实验的10个参数与孔隙度和渗透率的相关性开展分析,挑选出 α 在0.01条件下双侧相关的参数,与孔隙度显著相关的参数有孔隙体积、孔喉半径均值、分选系数、中值压力、中值半径、排驱压力和退汞效率;与渗透率显著相关的参数有孔喉半径均值、分选系数、中值压力、中值半径和排驱压力。采用向后筛选策略对相关参数与孔隙度、渗透率分别做线性回归分析,最终确定的模型与孔隙度和渗透率具有较好的相关性,相关系数分别为0.735和0.745。

采用向后筛选策略,针对合水地区长8储层,利用高压压汞相关参数,以孔隙度为参考标准建立了储层微观非均质性综合评价参数 G_k (无量纲),模型为:

$$G_k = 53.794 + 0.550 \times \text{孔隙体积} - 3.728 \times \text{孔喉半径均值} - 12.441 \times \text{中值半径} + 0.141 \times \text{退汞效率} \quad (2)$$

以渗透率为参考依据,利用高压压汞数据建立了储层微观非均质性综合评价参数为 G_s (无量纲),模型为:
 $G_s = 3.037 - 1.671 \times \text{孔喉半径均值} + 8.601 \times \text{分选系数} - 4.656 \times \text{中值半径} + 3.104 \times \text{排驱压力}$
 (3)

3.3 参数应用和推广

3.3.1 参数 N 的适用性

利用华庆地区长6储层大量数据对上述得出的综合评价指数 N 与渗透率的关系做验证。 N 与本次研究所用样品整体渗透率的相关性呈明显的三段S形特征(图6a),每一段与渗透率都具有较好的相关性,相关系数分别为0.981 2,0.949 6和0.772 4。第一段表征的综合评价指数 N 的范围在0.58~0.69,渗透率介于 $(0.026 \sim 0.25) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图6b);第二段表征的综合评价指数 N 的范围在0.69~0.71,渗透率范围在 $(0.25 \sim 8.59) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图6c);第三段表征的综合评价指数 N 的范围在0.71~0.73,渗透率介于 $(8.59 \sim 10.11) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图6d)。

根据综合评价指数 N 将储层微观非均质性划分为3个等级:当综合评价指数 N 小于0.69时,储层为强微观非均质性;当综合评价指数 N 介于0.69~0.71时,储层为中等微观非均质性;当综合评价指数 N 大于

0.71时,储层为弱微观非均质性。据统计,华庆地区长6储层综合评价指数 N 的最大值为0.48,属于第一段,为强微观非均质性。

3.3.2 参数 G_k 和 G_s 的适用性

利用华庆地区长6储层和合水地区长8储层大量样品数据,分别对 G_k 和 G_s 进行验证,两者相关性均较好。其中,华庆地区长6储层孔隙度与 G_k 的相关系数为0.892 5,渗透率与 G_s 的相关系数为0.938 8;合水地区长8储层孔隙度与 G_k 的相关系数为0.567 0,渗透率与 G_s 的相关系数为0.718 7(表4)。说明两个参数可以分别与孔隙度和渗透率建立关系,进而对储层的非均质性做出较为准确的评价。

根据不同数据点在图中的分布,将储层的微观非均质性划分为3类:当 $G_s < -2$, $G_k < 6$ 时,储层为强非均质性;当 $G_s = -2 \sim 5$, $G_k = 6 \sim 14$ 时,储层为中等非均质性;当 $G_s > 5$, $G_k > 14$ 时,储层为弱非均质性。

综合来看,本文提出的综合评价参数 N , G_k 和 G_s 均能较好地定量评价储层微观非均质性,相较单因素评价参数,与孔隙度或渗透率的相关性均有较大幅度的提升,说明因子分析和向后筛选策略等数学方法在解决地质问题上具有较好的可行性。从利用华庆地区长6储层数据对综合评价参数 N , G_k 和 G_s 的验证结果来看,以填隙物充填指数和抗溶蚀指数为基础提取的综

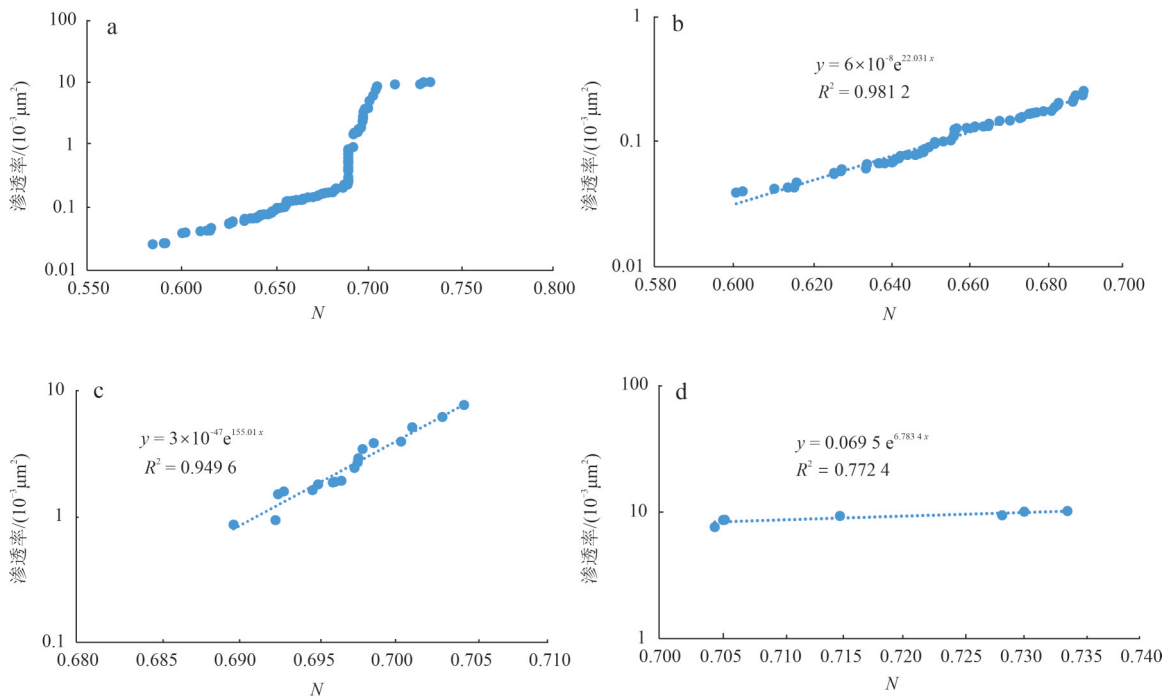


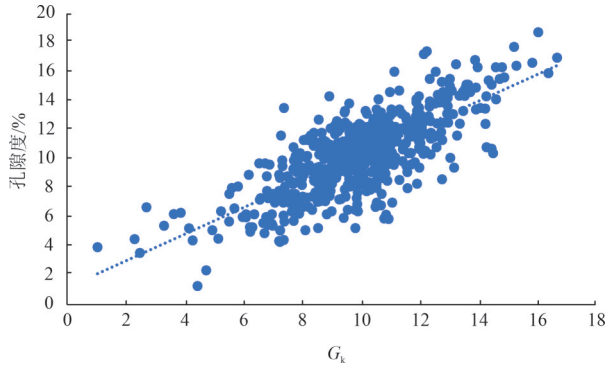
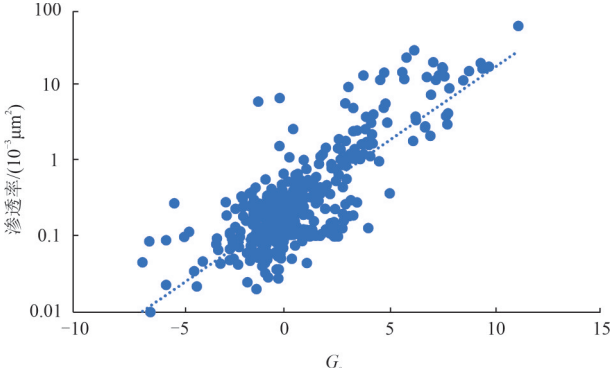
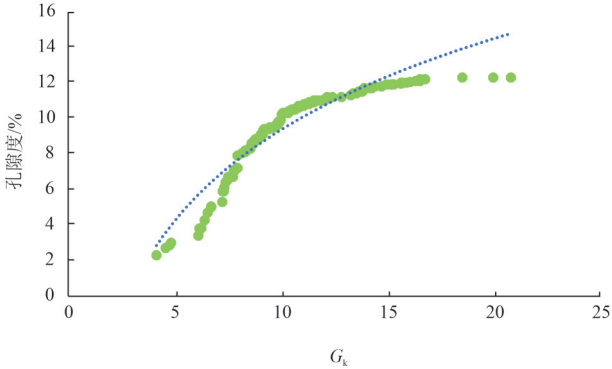
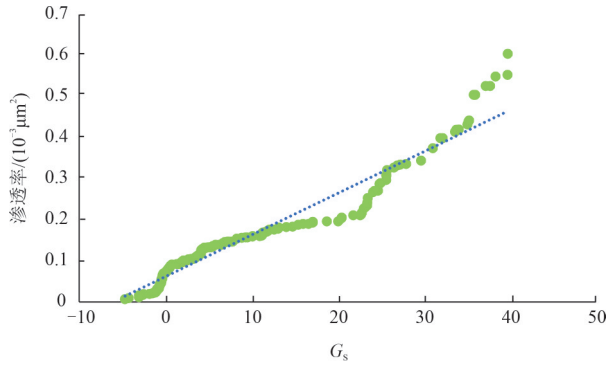
图6 华庆地区长6储层综合评价指数 N 与渗透率关系

Fig. 6 Relationship between comprehensive evaluation index N and permeability of Chang 6 reservoir in Huaqing area

a. 整体与渗透率关系; b. 第一段与渗透率关系; c. 第二段与渗透率关系; d. 第三段与渗透率关系

表 4 鄂尔多斯盆地储层微观非均质性综合评价参数 G_k 和 G_s 检验表

Table 4 Test of G_k and G_s , parameters for comprehensive evaluation of microscopic reservoir heterogeneity

储层	评价参数	散点图	公式	相关系数	样品个数
合水地区长 8	G_k		$y = 0.9143x + 1.1625$	$R^2 = 0.5670$	579
	G_s		$y = 0.2048e^{0.4467x}$	$R^2 = 0.7187$	478
华庆地区长 6	G_k		$y = 7.4065\ln x - 7.7001$	$R^2 = 0.8925$	167
	G_s		$y = 0.0101x + 0.0611$	$R^2 = 0.9388$	212

合指数 N 相较于以高压压汞参数为基础提取的综合评价参数 G_k 和 G_s , 对储层微观非均质性的评价更加准确, 同时也说明要解决地质问题的复杂性和不确定性, 利用简单的单因素分析法很难达到目的。

储层微观非均质性通常受沉积相、砂体厚度、隔夹层发育程度、岩石成分、矿物含量、胶结物含量、孔隙结构和孔喉分布特征等多种因素控制, 定量评价储层微观非均质性难度较大。本文主要依托于薄片数据和高

压汞数据,采用数学方法综合评价储层微观非均质性,利用软件对相应参数进行整合,减小了人为主观因素的影响,使评价参数更加客观,评价结果更加准确。虽然对缺少相应数据的区域应用较为有限,但是基于储层微观非均质性评价的复杂性,这些数据的获取又是不可或缺的,通过对这些数据的处理来提高储层微观非均质性评价的准确性是非常有必要的。目前该方法在地质上的应用还处于初步探索阶段,只适用于已有相关数据的区域,对于缺少相关数据的区域还需要利用更易获得的数据进行更深入的研究。

4 结论

1) 华庆地区长6储层和合水地区长8储层岩石类型均以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主,储集空间以粒间孔和溶蚀孔为主。华庆地区长6储层孔喉半径存在2个峰值,主要分布在 $0.01 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 和 $0.08 \sim 0.20 \mu\text{m}$ 两个区间,孔隙度均值为9.6%;合水地区长8储层孔喉半径存在1个峰值,主要分布在 $0.08 \sim 0.30 \mu\text{m}$,孔隙度均值为10.9%。渗透率主要分布区间小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

2) 针对华庆地区长6储层,利用向后筛选策略提出综合评价指数 N ,用于对储层微观非均质性进行评价。将储层微观非均质性划分为3个等级:当 $N < 0.69$ 时,储层为强微观非均质性;当 $N = 0.69 \sim 0.71$ 时,储层为中等微观非均质性;当 $N > 0.71$ 时,储层为弱微观非均质性。华庆地区长6储层综合评价指数 N 的最大值为0.48,为强微观非均质性。

3) 基于高压压汞参数,针对合水地区长8储层,采用向后策略对相关参数与孔隙度和渗透率的相关性分别做线性回归分析,将储层的微观非均质性划分为3类:当 $G_s < -2$, $G_k < 6$ 时,储层为强非均质性;当 $G_s = -2 \sim 5$, $G_k = 6 \sim 14$ 时,储层为中等非均质性;当 $G_s > 5$, $G_k > 14$ 时,储层为强非均质性。

4) 综合评价参数 N , G_k 和 G_s 与储层的孔隙度和渗透率均有较好的相关性,相关性较单个评价参数明显增强,可以用来定量评价储层微观非均质性,总体而言 N 的评价效果较 G_k 和 G_s 更好。向后筛选策略在华庆地区长6储层和合水地区长8储层微观非均质性定量评价中的应用取得了较为理想的结果,进而印证了数学方法在解决地质问题上的可行性。

参 考 文 献

[1] 于翠玲. 储层非均质性对油气成藏与分布的影响研究[D]. 东

营: 中国石油大学, 2007.

Yu Cuiling. Study on the impact of reservoir heterogeneity on hydrocarbon accumulation and distribution [D]. Dongying: China University of Petroleum, 2007.

[2] 岳亮, 孟庆强, 刘自亮, 等. 致密砂岩储层物性及非均质性特征——以四川盆地中部广安地区上三叠统须家河组六段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 597-609.

Yu Liang, Meng Qingqiang, Liu Ziliang, et al. Physical property and heterogeneity of tight sandstone reservoirs: A case of the upper triassic 6th member of Xujiahe Formation, Guang'an, central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 597-609.

[3] 单祥, 郭华军, 郭旭光, 等. 低渗透储层孔隙结构影响因素及其定量评价——以准噶尔盆地金龙2地区二叠系上乌尔禾组二段为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(3): 637-649.

Shan Xiang, Guo Huajun, Guo Xuguang, et al. Influencing factors and quantitative assessment of pore structure in low permeability reservoir: A case study of 2nd member of Permian Upper Urho Formation in Jinlong 2 Area, Junggar Basin [J]. Journal of Jinlin University (Earth Science Edition), 2019, 49(3): 637-649.

[4] 桑轼辙, 邓宝康, 马振宇, 等. 鄂尔多斯盆地吴起油田长6₃储层非均质性研究[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(2): 86-89+93.

Sang Shizhe, Deng Baokang, Ma Zhenyu, et al. Study on heterogeneity of Chang 6₃ reservoir in Wuqi oilfield in Ordos basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(2): 86-89+93.

[5] 陈建文, 张晓博, 韩詹, 等. 鄂尔多斯盆地合水地区长2³沉积相及储层非均质性研究[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(2): 61-65.

Chen Jianwen, Zhang Xiaobo, Han Zhan, et al. Sedimentary facies and reservoir heterogeneity of Chang 2³ in Heshui area of Ordos basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(2): 61-65.

[6] 王猛, 叶青, 袁丙龙, 等. 基于量化参数的储层非均质性分布规律研究——以涪西南凹陷为例[J]. 断块油气田, 2020, 27(05): 597-602.

Wang Meng, Ye Qing, Yuan Binglong, et al. Distribution regularity research of reservoir heterogeneity based on quantitative parameters: A case study of Weixinan Sag [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(5): 597-602.

[7] 孙军昌, 周洪涛, 郭和坤, 等. 复杂储层岩石微观非均质性分形几何描述[J]. 武汉工业学院学报, 2009, 28(3): 42-46.

Sun Junchang, Zhou Hongtao, Guo Hekun, et al. Characterization of complex rock micro-heterogeneity using fractal geometry [J]. Journal of Wuhan polytechnic University, 2009, 28(3): 42-46.

[8] 赵迪斐, 郭英海, 朱炎铭, 等. 海相页岩储层微观孔隙非均质性及其量化表征[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(2): 296-307.

Zhao Difei, Guo Yinghai, Zhu Yanming, et al. Analysis of micro-scale heterogeneity characteristics in marine shale gas reservoir (II): Pore heterogeneity and its quantitative characterization [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(2): 296-307.

[9] 董利飞, 何建华, 金崧. 岩石颗粒非均质性的水驱开发效果的影响[J]. 特种油气藏, 2018, 25(1): 73-77.

Dong Lifei, He Jianhua, Jin Yin. Influence of rock particle

- heterogeneity on water flooding development effect [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2018, 25(1): 73-77.
- [10] 曹江骏, 陈朝兵, 程皇辉, 等. 成岩作用对深水致密砂岩储层微观非均质性的影响——以鄂尔多斯盆地合水地区长7油层组为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(4): 1031-1046.
- Cao Jiangjun, Chen Zhaobing, Cheng Huanghui, et al. Effect of diagenesis on microheterogeneity of deepwater tight sandstone reservoirs: A case study from the Triassic Chang 7 oil-bearing formation in Heshui area, Ordos Basin, NW China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(4): 1031-1046.
- [11] 曹江骏, 罗静兰, 马迪娜·马吾提汗, 等. 微观非均质性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 Jiangjun, Luo Jinglan, Madina·Mawutihan, et al. Influence mechanism of micro-heterogeneity on conglomerate reservoir densification: A case study of Upper Permian Wutonggou Formation in DN8 Area of Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin [J]. *Earth Science*, 2021, 46(10): 3435-3452.
- [12] 陈朝兵, 付玲, 陈新晶, 等. 致密砂岩微观非均质性定量评价方法研究——以鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长6油层组为例[J]. *沉积学报*, 2021, 39(5): 1086-1099.
- Chen Zhaobing, Fuling, Fu Xinjing, et al. Quantitative evaluation method for micro heterogeneity of tight sandstone: A case study of Chang-6 reservoir of Yanchang Formation in Huaqing area, Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(5): 1086-1099.
- [13] 臧士宾, 郑永仙, 崔俊, 等. 砂砾岩储集层微观非均质性定量评价——以柴达木盆地昆北油田为例[J]. *岩性油气藏*, 2018, 30(3): 35-42.
- Zang Shibin, Zheng Yongxian, Cui Jun, et al. Quantitative evaluation on micro-heterogeneity of glutenite reservoir: A case study of Kunbei Oilfield in Qiadam Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2018, 30(3): 35-42.
- [14] 林伶, 景海权. 洛伦兹曲线在微观非均质性研究中的应用[J]. *复杂油气藏*, 2016, 9(2): 15-18.
- Lin Ling, Jing Haiquan. Application of Lorentz curves in the research of microscopic heterogeneity [J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2016, 9(2): 15-18.
- [15] 王卫红. 苏里格气田东区盒8段河流砂体沉积及其非均质性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- Wang Weihong. Research on fluvial sand deposition and heterogeneity to He 8 in the east region adjacent to Sulige Gas Field [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016.
- [16] 卢晨刚, 张遂安, 毛潇潇, 等. 致密砂岩微观孔隙非均质性定量表征及储层意义——以鄂尔多斯盆地X地区山西组为例[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(4): 556-561.
- Lu Chengang, Zhang Suian, Mao Xiaoxiao, et al. Quantitative characterization of microscopic pore heterogeneity in tight sandstones and its reservoir significance: A case study of the Shanxi Formation in X area, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(4): 556-561.
- [17] 刘池洋, 王建强, 张东东, 等. 鄂尔多斯盆地油气资源丰富的成因与赋存-成藏特点[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1011-1029.
- Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Zhang Dongdong, et al. Genesis of rich hydrocarbon resources and their occurrence and accumulation characteristics in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1011-1029.
- [18] 罗清清, 刘波, 姜伟民, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马家沟组五段白云岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 102-115.
- Luo Qingqing, Liu Bo, Jiang Weimin, et al. Diagenesis and pore evolution of dolomite reservoir in the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, central Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 102-115.
- [19] 淡卫东, 邓静, 毛振华, 等. 鄂尔多斯盆地长7油层组深水重力流沉积分布特征及成因[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2019, 16(8): 1-7+133.
- Dan Weidong, Deng Jing, Mao Zhenhua, et al. The deep water gravity flow sedimentations in Chang7 Reservoir of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2019, 16(8): 1-7+133.
- [20] 冯程, 樊海涛, 石玉江, 等. 润湿性影响下低渗透储层地层水矿化度预测——以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组长8段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 442-448.
- Feng Cheng, Fan Haitao, Shi Yujiang, et al. Prediction for the formation water salinity in low-permeability reservoirs with complex wettability: A case study of the Triassic Chang 8 member, Longdong area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 442-448.
- [21] 孟选刚, 徐帅康. 浅湖细粒沉积特征及砂体叠加样式[J]. *西安科技大学学报*, 2021, 41(2): 307-315.
- Meng Xuanguang, Xu Shuaikang. Sedimentary characteristics of fine-grained shallow lakes and superimposition patterns of sandbodies [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2021, 41(2): 307-315.
- [22] 陈朝兵, 赵振宇, 付玲, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组6段深水致密砂岩填隙物特征及对储层发育的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1098-1111.
- Chen Zhaobing, Zhao Zhenyu, Fu Ling, et al. Interstitial matter and its impact on reservoir development in Chang 6 deep water tight sandstone in Huaqing area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1098-1111.
- [23] 时保宏, 秦馨雨, 张才利, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组6段油藏差异成藏因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1112-1123.
- Shi Baohong, Qin Xinyu, Zhang Caili, et al. Insights on factors causing differential enrichment of Chang 6 Member in Jiyuan Area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1112-1123.
- [24] Folk R L. *Petrology of sedimentary rocks* [M]. Austin, Texas: Hemphill Publishing Company, 1974: 182.
- [25] 田景春, 刘伟伟, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界致密砂岩储层非均质性特征[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 183-189.
- Tian Jingchun, Liu Weiwei, Wang Feng, et al. Heterogeneity of the paleozoic tight sandstone reservoirs in Gaoqiao Area of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 183-189.
- [26] 吴小斌, 侯加根, 田小洁, 等. 姬塬地区低渗砂岩储层微观非均质性表征[J]. *新疆地质*, 2011, 29(3): 311-313.
- Wu Xiaobin, Hou Jiagen, Tian Xiaojie, et al. The synthesis methodology of micro-anisotropy characteristic of low permeability sandstone reservoir of Yanchang Formation, Jiyuan Area, Ordos Basin [J]. *Xinjiang Geology*, 2011, 29(3): 311-313.

- [27] 王斌会,李雄英. 稳健因子分析方法的构建及比较研究[J]. 统计研究,2015,32(5):84-90.
Wang Binhui, Li Xiongying. The formation and comparison of robust factor analysis method [J]. Statistical Research, 2015, 32 (5):84-90.
- [28] Cattell R B. The scree test for the number of factors[J]. Multivariate Behavioral Research, 1966, 1(1):245-276.
- [29] 孔明,卞冉,张厚粲. 平行分析在探索性因素分析中的应用[J]. 心理科学,2007(4):924-925+918.
Kong Ming, Bianran, Zhang Houcan. The application of parallel analysis in exploratory factor analysis[J]. Psychological Science, 2007(4):924-925+918.
- [30] 齐向华. 基于满意度和忠诚度的图书馆用户细分研究[J]. 国家图书馆学刊,2021,30(3):42-54.
Qi Xianghua. Research on library user segmentation based on satisfaction and loyalty [J]. Journal of the National Library of China, 2021,30(3):42-54.
- [31] 梁燕. 关于沈阳市商业银行开户服务质量的评价研究[J]. 金融会计,2018,20(8):57-63.
Liang Yan. Evaluation and research on the service quality of shenyang commercial bank account opening [J]. Financial Accounting, 2018,20(8):57-63.
- [32] 田金方,陈珮珮,张小斐. 基于BOOSTRAP抽样的平行分析方法及其模拟研究[J]. 统计与决策,2012,26(23):4-8.
Tian Jinfang, Chen Peipei, Zhang Xiaofei. Parallel analysis method based on BOOSTRAP sampling and its simulation study [J]. Statistics & Decision, 2012,26(23):4-8.
- [33] 赵杨璐,段丹丹,胡饶敏,等. 基于EM算法的混合模型中子总体个数的研究[J]. 数理统计与管理,2020,39(1):35-50.
Zhao Yanglu, Duan Dandan, Hu Raomin, et al. On the number of components in mixture model based on em algorithm [J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2020, 39 (1) : 35-50.
- [34] 林莉兰. 基于三维构念的大学生英语自主学习力量表编制与检验[J]. 外语界,2013,34(4):73-80+96.
Lin Lilan. Compilation and test of college students' English autonomous learning ability scale based on three-dimensional construct[J]. Foreign Language World, 2013,34(4):73-80+96.
- [35] 赵志军,马德山. 民族院校教育过程公平性调查问卷的编制及分析[J]. 中国电力教育,2014,30(8):3-5.
Zhao Zhijun, Ma Deshan. The compilation and analysis of the questionnaire on the fairness of the educational process in national colleges and universities [J]. China Electric Power Education, 2014,30(8):3-5.
- [36] 谢伟林,聂华,孙容磊,等. 少驱动四足机器人设计与仿真[J]. 机械设计与制造,2018,56(8):244-247.
Xie Weilin, Nie Hua, Sun Ronglei, et al. Design and simulation of quadruped robot with less actuators [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018,56(8):244-247.
- [37] 刘国强. 我国消费者金融素养现状研究——基于2017年消费者金融素养问卷调查[J]. 金融研究,2018,61(3):1-20.
Liu Guoqiang. A study of financial literacy in china: Based on the 2017 financial literacy survey [J]. Journal of Financial Research, 2018,61(3):1-20.
- [38] 杜晋叶,史畅,马立娟,等. 主成分分析研究白酒基酒香气成分[J]. 中国酿造,2020,39(7):62-68.
Du Jinye, Shi Chang, Ma Lijuan, et al. Study on aroma components of baijiu base liquor by principal component analysis [J]. China Brewing, 2020,39(7):62-68.
- [39] 耿建新,刘圆圆. AH股公司境内外审计收费差异的影响因素研究[J]. 上海立信会计学院学报,2009,23(6):58-67.
Geng Jianxin, Liu Yuanyuan. Study on influencing factors of audit fee differences between mainland auditors and hong kong auditors for dual listed companies [J]. Journal of Shanghai Lixin University of Accounting and Finance, 2009,23(6):58-67.
- [40] 杨蕾,顾婉婷. 城市经济发展要素支撑体系及效率评价——以广东佛山为例[J]. 江西社会科学,2015,35(11):62-67.
Yang Lei, Gu Wanting. The support system and efficiency evaluation of urban economic development factors——Taking Foshan, Guangdong as an example [J]. Jiangxi Social Sciences, 2015,35(11):62-67.
- [41] 徐宁,徐向艺. 股票期权激励契约合理性及其约束性因素——基于中国上市公司的实证分析[J]. 中国工业经济,2010,263(2):100-109.
Xu Ning, Xu Xiangyi. The rationality and restrictive factors of stock option incentive contracts: Based on the data of China's listed companies [J]. China Industrial Economics, 2010,263(2):100-109.
- [42] 包国为. 聚众斗殴罪量刑实证研究[J]. 政法论丛,2017,33(4):128-138.
Bao Guowei. An empirical study on the sentencing of crime of affray [J]. Zhengfa Luncong, 2017,33(4):128-138.
- [43] 庄宇,胡晓蕊,马贤娣. 水环境承载力与经济效率的多元回归模型及应用[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(9):41-45.
Zhuang Yu, Hu Xiaorui, Ma Xiandi. A multiple regression model of water environment carrying capacity and economic efficiency and its application [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007,21(9):41-45.
- [44] 黎军,宋亚峰. 我国普通高校教育学院设置现状及其影响因素研究[J]. 教育与教学研究,2017,31(10):19-27.
Li Jun, Song Yafeng. Research on the present situation and influencing factors of the setting up of education school in universities in China [J]. Education and Teaching Research, 2017,31(10):19-27.
- [45] 史杨焱,王尔旭,李佳佳. 中国跨境电商物流市场规模预测研究[J]. 科技导报,2020,38(5):105-112.
Shi Yangyan, Wang Erxu, Li Jiajia. Prediction of cross border e-commerce logistics market in China [J]. Science & Technology Review, 2020,38(5):105-112.

(编辑 张玉银)