

文章编号: 0253-2697(2026)04-0849-17 DOI:10.7623/syxb202604008

# 微米—纳米级多孔介质中可动流体分布特征与敏感因子

——以四川盆地简阳地区须家河组四段致密砂岩储层为例

霍利娜<sup>1,2</sup> 姜福杰<sup>1,2</sup> 马 勇<sup>1,2</sup> 金值民<sup>3</sup> 秦长彩<sup>4</sup> 曹 流<sup>1,2</sup> 张修涛<sup>1,2</sup>  
冯斌豪<sup>1,2</sup> 于森琇缘<sup>1,2</sup> 王璐奕<sup>1,2</sup> 曹科技<sup>1,2</sup>

(1. 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京) 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249;  
3. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院 四川成都 610041; 4. 重庆万普隆能源技术有限公司 重庆 401331)

**摘要:** 简阳地区须家河组四段(须四段)是四川盆地陆相致密气增储上产的关键领域,但储层的含气性差异大,流体可动性的主控机制不清,严重制约了致密气的高效勘探开发。基于多尺度表征技术,结合构建的 Pearson 相关分析-灰色关联法-随机森林算法多方法融合框架,系统开展了微米—纳米孔隙中可动流体分布规律及其敏感因子的定量研究。研究结果表明:①依据孔隙类型和分形特征,简阳地区须四段致密储层的孔隙系统可划分为微孔(孔径为 0~0.01 μm)、小孔(孔径为 0.01~0.10 μm)、中孔(孔径为 0.10~1.00 μm)和大孔(孔径>1.00 μm),其中,小孔(平均占比为 37.12%)与中孔(平均占比为 25.82%)是致密储层的主要储集空间,且以黏土矿物晶间孔和粒内溶孔为主。②可动流体主要赋存在小孔(平均占比为 19.12%)和中孔(平均占比为 18.13%),而束缚流体主要分布在小孔中(平均占比为 18.00%)。③孔隙结构参数(小孔占比、饱和流体中值半径、中孔分形维数等)为控制流体可动性的核心敏感因子,显著影响着流体的可动性,而伊/蒙混层、碳酸盐矿物则通过控制与改造储层的孔隙结构间接影响流体可动性;流体可动性的主控因素呈现出“孔隙结构主导,矿物组间接影响”的特征。研究成果以期为致密砂岩储层的流体可动性评价与优质储层预测提供理论新范式。

**关键词:** 致密砂岩储层;可动流体;敏感因子;须家河组;四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## Distribution characteristics and sensitive factors of movable fluids in micro-nano porous media: a case study of tight sandstone reservoir in the Member 4 of Xujiahe Formation in Jianyang area of Sichuan Basin

Huo Lina<sup>1,2</sup> Jiang Fujie<sup>1,2</sup> Ma Yong<sup>1,2</sup> Jin Zhimin<sup>3</sup> Qin Changcai<sup>4</sup> Cao Liu<sup>1,2</sup>  
Zhang Xiutao<sup>1,2</sup> Feng Binhao<sup>1,2</sup> Yu Senxiuyuan<sup>1,2</sup> Wang Luyi<sup>1,2</sup> Cao Keji<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;  
2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Sichuan Chengdu 610041, China;  
4. OPRO Energy Technology Co., Ltd, Chongqing 401331, China)

**Abstract:** The Member 4 of Xujiahe Formation in Jianyang area is a key target for increasing the reserves and production of continental tight gas in Sichuan Basin. However, the substantial heterogeneity in gas-bearing properties and the undefined dominant mechanisms governing fluid mobility severely restrict the efficient exploration and development of tight gas. Based on multi-scale characterization techniques combined with an integrated framework combining Pearson correlation analysis, grey correlation, and random forest algorithm, this study systematically investigates the distribution patterns of movable fluids in micro-nano pores and quantitatively identifies their sensitive factors. The results show as follows. (1) According to pore types and fractal characteristics, the pore system can be classified into micropores (pore size ranging from 0 to 0.01 μm), small pores (pore size ranging from 0.01 to 0.10 μm), mesopores (pore size ranging from 0.10 to 1.00 μm), and macropores (pore size greater than 1.00 μm). Among them, small pores (with an average proportion of 37.12%) and mesopores (with an average proportion of 25.82%) constitute the main reservoir spaces in the tight sandstone, dominated by intercrystalline pores and intragranular dissolved pores in clay minerals. (2) Movable fluids are prima-

基金项目: 新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1400206)资助。

第一作者: 霍利娜, 女, 1999年10月生, 2021年获中国石油大学(北京)学士学位, 现为中国石油大学(北京)博士研究生, 主要从事油气成藏机理研究。Email: hln10171007@163.com

通信作者: 姜福杰, 男, 1979年12月生, 2008年获中国石油大学(北京)博士学位, 现为中国石油大学(北京)教授、博士生导师, 主要从事油气成藏机理与分布规律的研究工作。Email: jiangfj@cup.edu.cn

rily hosted in small pores (with an average proportion of 19.12%) and mesopores (with an average proportion of 18.13%), while bound fluids are predominantly distributed in small pores (with an average proportion of 18.00%). (3) Pore structure parameters, including the proportion of small pores, median radius of saturated pores, and fractal dimension of mesopores, are the core sensitive factors controlling fluid mobility, significantly influencing its magnitude. Illite-smectite mixed layers and carbonate minerals indirectly affect fluid mobility by controlling and modifying pore structure in reservoirs. Pore structure dominates fluid mobility, while mineral components exert indirect influences. The research results are expected to provide a new theoretical paradigm for the evaluation of fluid mobility and the prediction of high-quality reservoirs in tight sandstone reservoirs.

**Key words:** tight sandstone reservoir; movable fluid; sensitive factor; Xujiahe Formation; Sichuan Basin

引用: 霍丽娜, 姜福杰, 马勇, 金值民, 秦长彩, 曹流, 张修涛, 冯斌豪, 于森琇缘, 王璐奕, 曹科技. 微米—纳米级多孔介质中可动流体分布特征与敏感因子——以四川盆地简阳地区须家河组四段致密砂岩储层为例[J]. 石油学报, 2026, 47(4): 849-865.

Cite: HUO Lina, JIANG Fujie, MA Yong, JIN Zhimin, QIN Changcai, CAO Liu, ZHANG Xiutao, FENG Binhao, YU Senxiuyuan, WANG Luyi, CAO Keji. Distribution characteristics and sensitive factors of movable fluids in micro-nano porous media; a case study of tight sandstone reservoir in the Member 4 of Xujiahe Formation in Jianyang area of Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2026, 47(4): 849-865.

致密砂岩气作为重要的非常规清洁能源, 具有分布广泛、资源潜力大等特点, 已成为全球范围内油气增产上储的关键领域<sup>[1-3]</sup>。鄂尔多斯盆地上古生界、四川盆地上三叠统须家河组和塔里木盆地白垩系是中国3大代表性的致密砂岩气富集区<sup>[4-6]</sup>。2022年以来, 四川盆地斜坡带简阳地区多口钻井在须家河组四段(须四段)获得高产气流, 展现出良好的勘探潜力, 是四川盆地陆相致密砂岩气未来勘探的重要目标。测井解释与实验结果显示<sup>[4,7]</sup>, 简阳地区须四段在垂向上和平面上呈现出气层、气水层、水层等多种组合类型, 储层的气水分布关系复杂, 含气性差异显著, 严重制约了该地区致密砂岩气的高效勘探与开发。

孔隙结构与流体可动性刻画是致密砂岩储层质量评价及含气性评价的关键<sup>[6,8-9]</sup>。多孔介质中流体(以单一介质水为例)的赋存状态包括束缚流体(如黏土矿物结合水、毛细管束缚水)和可动流体(如自由水)等, 其赋存状态主要受孔隙大小、流体与壁面的毛细作用和电学作用等因素控制<sup>[9-12]</sup>。受复杂沉积与成岩演化过程制约, 致密砂岩储层具有复杂的微米—纳米级孔径分布特征及强微观非均质性, 进而形成了复杂多样的流体赋存特征<sup>[6,9-10]</sup>。此外, 不同尺度孔隙内流体的可动性差异显著, 如在天然气充注过程中, 流体在微孔、小孔中更难发生运移, 且对应更大的毛细管阻力<sup>[13-15]</sup>。目前, 相关研究多聚焦分析储层整体的流体可动性(如可动流体饱和度)及其影响因素, 包括储层物性、孔隙结构参数、黏土矿物含量及成岩作用等对流体可动性的控制作用<sup>[9-10,16-21]</sup>。由于现有的研究仍以宏观、整体评价为主, 缺乏对不同孔径级别下可动流体赋存特征的精细评价及其主控因素的定量识别, 这在一定程度上制约了含气性预测的精度与储层质量的精确评价<sup>[6,9,21]</sup>。

笔者优选四川盆地简阳地区须四段致密砂岩为研

究对象, 综合利用岩心、铸体薄片、扫描电镜、核磁共振、高压压汞等实验测试手段, 并结合分形理论, 实现了致密砂岩储层孔隙结构的多尺度定量表征。同时, 基于离心实验, 揭示出微米—纳米尺度下不同孔径范围内可动流体的赋存与分布特征及其影响因素。在此基础上, 笔者利用多方法融合框架系统算法识别出流体可动性参数的关键敏感因子, 建立了多方法交叉验证的敏感因子体系, 探讨了储层流体可动性差异的内在机制。研究成果以期创新致密砂岩储层的流体可动性评价方法, 为研究区致密砂岩储层的高效勘探开发提供理论依据。

## 1 地质背景

四川盆地位于扬子地台西部, 其结晶基底为元古代变质岩和花岗岩, 西侧为松潘—甘孜地体和龙门山, 北侧为秦岭褶皱带和米仓山—大巴山构造带, 东侧为雪峰山构造带。印支运动导致扬子板块西缘自SE向NW方向不断向下俯冲, 最终在盆内自西向东形成前陆冲断带、前陆拗陷带、前陆斜坡带和前陆隆起带的构造格局[图1(a)]。同时, 随着扬子地台的不断抬升, 盆内的沉积环境逐渐由海相转为陆相<sup>[4,22-23]</sup>。

四川盆地上三叠统须家河组主要发育三角洲相与湖泊相沉积, 地层厚度为300~3500 m, 自下而上可划分为6段。须家河组一段(须一段)、须家河组三段(须三段)和须家河组五段(须五段)发育黑色泥岩和含煤层系, 为主要烃源岩; 须家河组二段(须二段)、须四段和须家河组六段(须六段)以厚层砂岩为主, 是重要的致密砂岩气产层[图1(b)]。简阳地区位于四川盆地中部, 构造上隶属于前陆斜坡带, 整体为NW向展布的单斜构造。2022年, 简阳地区须四段致密砂岩气勘探获得高产气流, 成为四川盆地油气勘探开发的新领域<sup>[4,7]</sup>。受多物源体系供给影响, 简阳地区须家河组发

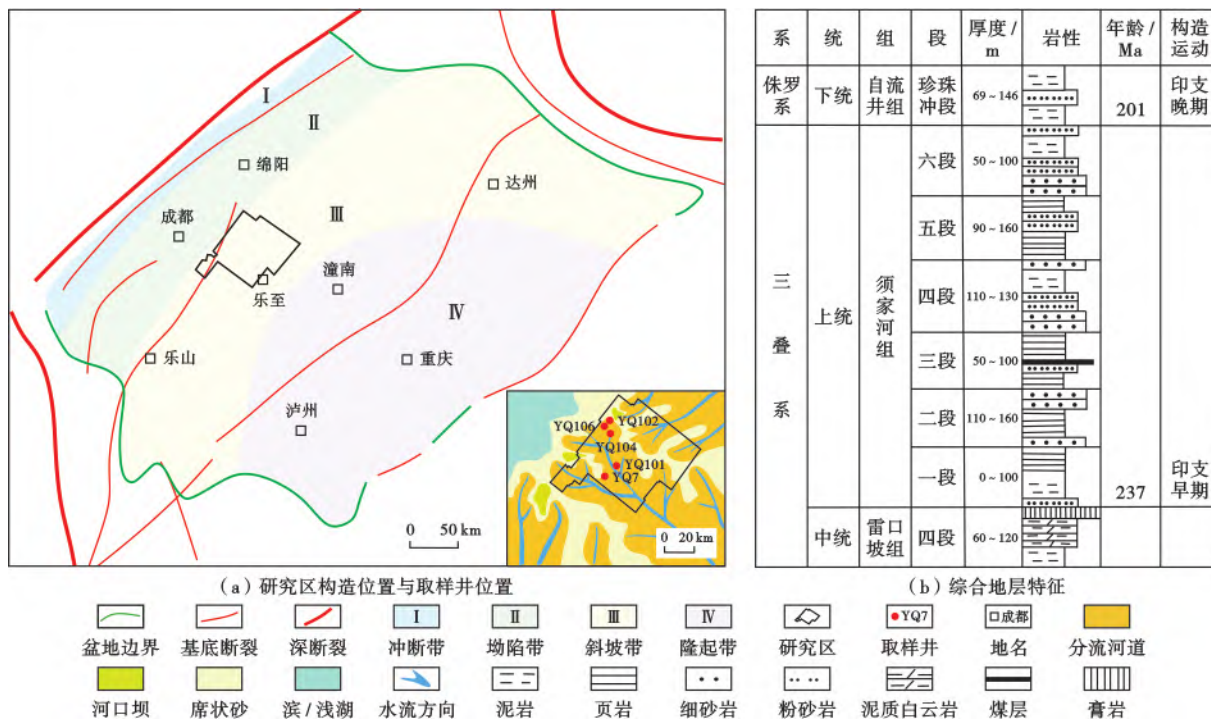


图 1 四川盆地简阳地区构造位置及上三叠统沉积特征(据文献[4,7]修改)

Fig. 1 Tectonic location and Upper Triassic sedimentary characteristics of Jianyang area in Sichuan Basin

育辫状河三角洲前缘沉积,水下分流河道、席状砂、河口坝等沉积微相内发育的厚层砂体构成了良好的储集体<sup>[7,24]</sup>。须家河组的岩石类型以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主。研究样品取自简阳地区须四段。笔者基于测井解释结果,选取了涵盖不同含气性的典型样品。样品埋深范围为 2 720~3 426 m,沉积环境大多为水下分流河道,该沉积微相为研究区最主要的储集砂体类型。

## 2 实验与方法

### 2.1 岩石物性、矿物组成与孔隙结构分析

实验所用样品均加工为规则柱塞状,直径约为 2.5 cm。沿样品横截面切取厚度为 1~2 cm 的岩样,分别用于制备铸体薄片、扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)的分析样品。岩石孔隙度和渗透率测试采用 PDP-200 型脉冲衰减渗透仪完成。矿物组成特征与微观孔隙结构特征观察采用 ZEISS Axioscope 5 型偏光显微镜和 ZEISS Merlin 型场发射扫描电子显微镜(FE-SEM),并获取高分辨率显微图像。此外,岩石矿物定量分析采用配备 Cu-K $\alpha$  辐射源(波长为 0.154 06 nm)的 Bruker D8 Discover 型 X 射线粉晶衍射仪,衍射图谱采集的衍射角扫描范围为 5°~90°,步长为 0.05°,接收狭缝宽度为 0.3 mm。矿物相定量分析在 Bruker AXS Topas V7.0 软件中进行,背景建模采用 Chebyshev 多项式模型。

### 2.2 核磁共振实验

在核磁共振实验中,弛豫是指激发态高能核自旋恢复至最低能基态的过程。横向弛豫时间( $T_2$ )由 3 种弛豫机制共同控制,分别为反映流体本征性质的体相弛豫时间( $T_{2B}$ )、表征流体-固体界面相互作用的表面弛豫时间( $T_{2S}$ )以及梯度场诱导的扩散弛豫时间( $T_{2D}$ )<sup>[14,25-26]</sup>。其关系式为:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_{2B}} + \frac{1}{T_{2S}} + \frac{1}{T_{2D}} = \frac{1}{T_{2B}} + \rho \frac{S}{V} + \frac{D_i(\gamma G T_E)^2}{12} \approx \rho \frac{S}{V} \quad (1)$$

其中, $T_{2B}$ 远大于  $T_{2S}$ ,且当回波时间低于 0.6 ms 时,式(1)中的  $T_{2B}$ 项与  $T_{2D}$ 项可忽略<sup>[10,12]</sup>。实验分析依据行业标准《岩样核磁共振参数实验室测量规范》<sup>[27]</sup>开展。仪器的工作频率为 9.72 MHz,磁场强度约为 0.28 T,核磁共振信号采用 CPMG 序列采集。关键参数设置如下:回波时间为 0.1 ms,扫描次数为 64,等待时间为 4 000 ms,回波个数为 6 144。具体测试流程为:①将岩样置于 60 °C 真空烘箱中干燥 96 h,使用电子天平检测并记录质量变化;②在 20 MPa 条件下对干燥岩样进行真空饱和 72 h,称取湿重后,对其开展核磁共振测试,获得饱和态横向弛豫时间谱;③采用 10 000 r/min 离心机对岩样进行 1 h 离心处理,实验温度恒定为 14.5 °C,离心结束后称取岩样质量,然后再次对岩样进行核磁共振测试,获得离心态横向弛豫时间谱。

### 2.3 分形维数分析

分形理论可用于定量表征岩石孔隙结构的复杂非均质性。基于分形几何原理,储层的孔隙数( $N$ )与孔径( $r$ )满足幂律关系<sup>[5,10]</sup>:

$$N = \int_r^{r_{\max}} P(r) dr \propto r^{-D} \quad (2)$$

分形维数( $D$ )越接近3,说明岩石中的孔喉形态越不规则、表面越粗糙、小孔越发育,储层非均质性越强; $D$ 越接近2,表明岩石的孔喉结构越有序、表面越光滑<sup>[5,10,28]</sup>。

基于核磁共振实验测得的岩样的  $T_2$  数据,可通过累积孔隙体积分数( $S_v$ )与  $T_2$  的双对数关系<sup>[28]</sup>获得分形维数:

$$\log(S_v) = (3 - D)\log(T_2) + (D - 3)\log(T_{2\max}) \quad (3)$$

### 2.4 敏感因子确定方法

笔者构建了多方法融合框架系统,以实现致密砂岩储层流体可动性参数的定量评价与核心敏感因子的精准识别(图2)。研究首先运用 Pearson 相关分析量化变量间的线性关系,并采用灰色关联法评估序列间的几何相似性(关联度取值范围为 0~1),从而捕捉小样本条件下的非线性系统行为。两种方法并行实施,共同构建敏感因子的候选集。为进一步克服上述两种方法在特征交互和量化重要性方面的局限性,笔者引入了随机森林算法。基于决策树集成机器学习模型,评估特征交互预测的贡献度,捕捉变量间复杂的交

互效应<sup>[5-6]</sup>。模型中,决策树的数量设置为 100,随机种子数固定为 42,以确保结果的可重复性。同时,启用袋外误差评估模型的泛化能力和可靠性,将决策树的最大深度设为默认值,以保证决策树的充分生长,从而完整捕捉特征间的复杂交互作用。该框架通过 Pearson 分析揭示线性统计规律,灰色关联分析捕捉非线性系统行为,随机森林算法量化特征交互的贡献权重与交互机制,形成多方法交叉验证的敏感因子识别体系,为致密砂岩储层的流体可动性评价提供了创新性的方法论支撑。

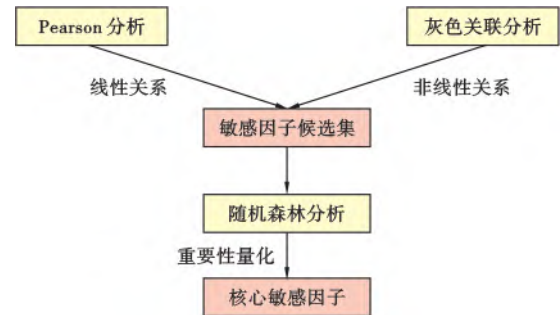


图2 多方法融合的框架系统

Fig. 2 Integrated multi-method framework

## 3 实验分析结果

### 3.1 岩石物性与矿物组成

岩石物性测试结果(表1)表明:简阳地区须四段致密砂岩的孔隙度分布范围为 1.54%~6.34%,平均

表1 简阳地区须家河组四段致密砂岩储层的物性与矿物组成

Table 1 Physical properties and mineral compositions of the tight sandstone reservoir in the Member 4 of Xujiahe Formation in Jianyang area

样品号	孔隙度/ %	渗透率/ mD	$I_{RQ}$	$I_{FZ}$	矿物含量/%					黏土矿物含量%			
					石英	长石	碳酸盐矿物	黏土矿物	黑云母	高岭石	伊利石	伊/蒙混层	绿泥石
Y13-2745.41	5.86	0.282	0.069	1.107	70.22	17.76	1.79	8.81	1.42	1.22	1.89	4.18	1.52
Y14-2752.43	5.70	0.070	0.035	0.577	64.52	20.12	0	14.02	1.34	1.26	1.69	9.21	1.86
Y15-2761.61	6.18	0.215	0.059	0.891	74.30	15.20	2.05	7.37	1.08	0	1.05	5.06	1.26
Y16-2772.47	3.14	0.080	0.050	1.540	58.45	17.30	16.64	6.60	1.01	1.09	0	4.49	1.02
Y17-3372.51	5.87	0.160	0.052	0.832	71.90	18.07	0	10.04	0	0	2.95	5.25	1.84
Y19-3379.32	6.08	0.116	0.043	0.671	63.75	20.78	0	13.76	1.71	2.82	3.29	5.15	2.50
Y2-3358.30	2.12	0.003	0.011	0.514	50.12	19.62	2.58	25.73	1.96	6.19	6.79	8.95	3.80
Y21-3380.80	6.34	0.062	0.031	0.459	68.33	17.58	1.41	11.14	1.54	1.41	1.11	6.70	1.92
Y22-3399.48	5.14	0.027	0.023	0.419	62.24	20.89	0	15.60	1.27	1.36	1.82	10.37	2.05
Y26-3141.47	3.09	0.012	0.020	0.618	54.49	18.96	17.5	8.03	1.02	1.21	0	5.68	1.14
Y3-3409.05	2.60	0.192	0.085	3.187	58.31	15.43	2.67	21.88	1.70	4.21	5.04	10.46	2.17
Y4-3425.30	2.76	1.988	0.267	9.397	64.85	15.14	4.39	15.61	0	4.45	3.69	7.47	0
Y6-3330.73	4.96	1.295	0.160	3.075	52.50	21.91	1.48	22.59	1.51	2.89	6.49	10.22	2.99
Y79-2721.53	4.27	0.660	0.123	2.768	68.64	21.04	0	9.31	1.01	0	2.09	5.61	1.61
Y80-2720.46	4.54	0.810	0.133	2.789	60.11	22.69	0	17.20	0.00	0	4.92	10.36	1.92
Y81-2763.00	5.82	0.317	0.073	1.186	58.42	20.62	1.23	18.57	1.16	0	5.12	12.12	1.33
Y82-2763.50	6.01	3.210	0.229	3.589									
Y83-3391.73	6.10	0.609	0.099	1.525	81.25	14.74	0	4.02	0	0	4.02	0	0
Y84-3137.66	5.85	0.057	0.031	0.500	71.51	14.62	0	12.74	1.13	2.80	3.59	5.34	1.01
Y85-2753.95	2.41	0.070	0.053	2.165	55.16	21.51	17.28	6.05	0	0	0	4.60	1.45
Y86-3382.16	1.54	0.002	0.011	0.735	43.49	18.11	30.79	7.60	0	3.38	1.92	0	2.30

为 4.59%；渗透率分布范围为 0.002~3.210 mD，平均为 0.490 mD，整体属于典型的致密砂岩储层。孔隙度接近的样品，其渗透率可相差 2 个数量级，反映出储层孔喉结构复杂、非均质性较强的特征。基于水力流动单元理论，笔者计算得到储层质量指数 ( $I_{RQ}$ ) 与储层流动指数 ( $I_{FZ}$ )：

$$I_{RQ} = 0.0314 \times \sqrt{K/\phi} \quad (4)$$

$$I_{FZ} = I_{RQ} \times \frac{100 - \phi}{\phi} \quad (5)$$

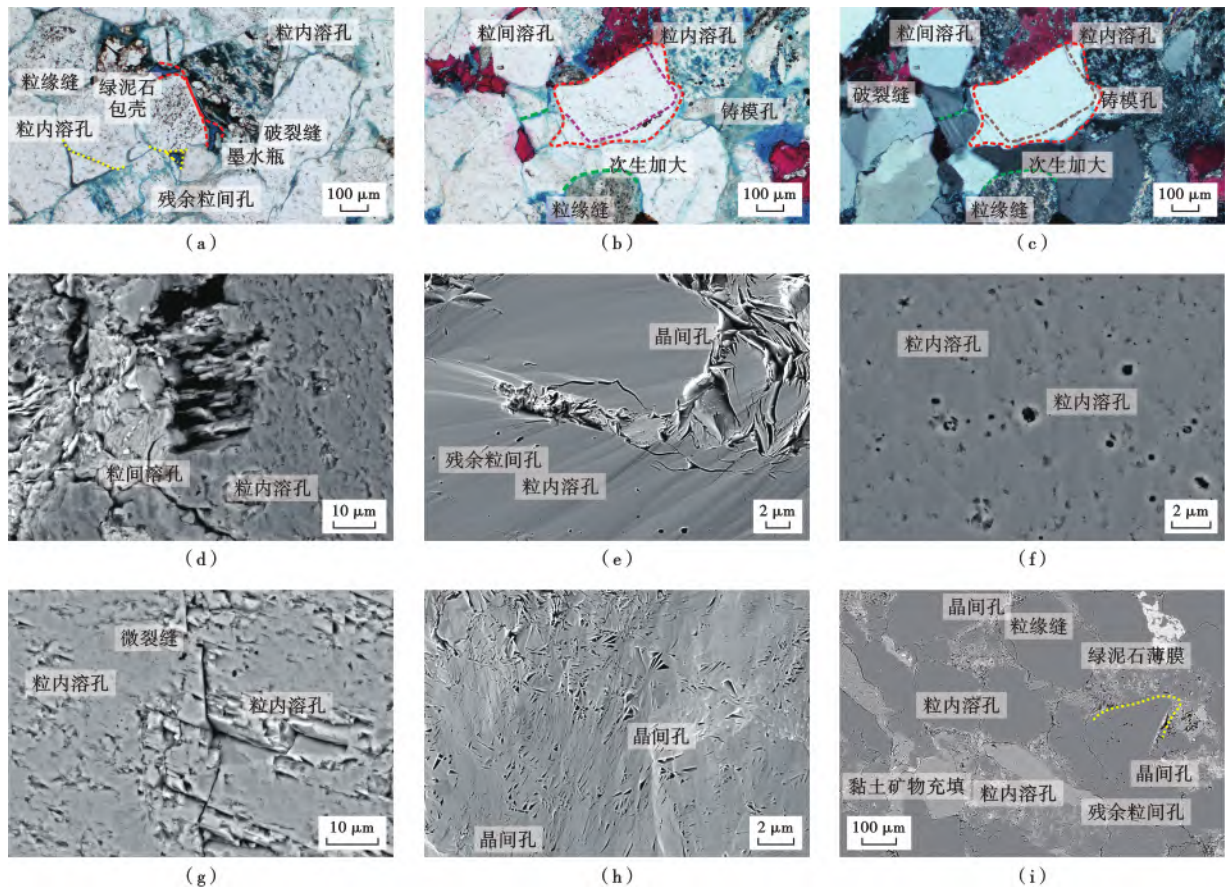
$I_{RQ}$  与  $I_{FZ}$  数值越高，代表储层的孔渗品质越好<sup>[5]</sup>。

简阳地区须四段致密砂岩储层的矿物组成以石英和长石为主，黏土矿物和碳酸盐矿物次之。石英含量为 43.49%~81.25% (平均为 62.63%)，长石含量为 14.62%~22.69% (平均为 18.60%)，黏土矿物含量

为 4.02%~25.73% (平均为 12.83%)，碳酸盐矿物含量为 0%~30.79% (平均为 4.99%)，黑云母含量为 0%~1.96% (平均为 0.94%)。黏土矿物包括伊/蒙混层 (0%~12.12%，平均为 6.91%)、伊利石 (0%~6.79%，平均为 2.92%)、绿泥石 (0%~3.80%，平均为 1.65%) 和高岭石 (0%~6.19%，平均为 1.63%)。

### 3.2 储集空间特征

简阳地区须四段致密砂岩储层中孔隙类型多样，以粒内溶孔和晶间孔为主，其次为粒间溶孔和残余粒间孔，局部可见微裂缝。残余粒间孔为原生孔隙经压实作用、胶结作用后的残留空间，通常与石英次生加大和黏土矿物伴生，显微观察可见其数量较少，多呈多边形、三角形或不规则状分布，但孔径相对较大，连通性较好，发育“墨水瓶型孔”[图 3(a)]。粒间溶孔主要由



(a) 残余粒间孔多以墨水瓶状存在，长石粒内溶孔，石英颗粒边缘发育绿泥石包壳，YQ106 井 3 330.73 m；(b) 长石和岩屑粒内溶孔，可见铸模孔，粒缘缝和颗粒破裂缝，方解石胶结物和石英次生加大边堵塞孔隙，YQ101 井 2 745.41 m；(c) 方解石胶结物和石英次生加大边堵塞孔隙，压实作用较强，以线一凹凸接触为主，YQ101 井 2 745.41 m；(d) 溶蚀孔，可见微米级粒间溶孔，局部被黏土矿物充填，形状不规则，YQ102 井 3 379.32 m；(e) 残余粒间孔被叶片状绿泥石充填，粒内溶孔和绿泥石晶间孔，YQ106 井 3 358.30 m；(f) 长石粒内溶孔，多以圆形、椭圆形为主，从几纳米至几百纳米均有分布，YQ106 井 3 358.30 m；(g) 粒内溶孔，可见微裂缝，YQ101 井 2 745.41 m；(h) 伊利石晶间孔，以狭缝状、三角状为主，YQ106 井 3 330.73 m；(i) 残余粒间孔、黏土矿物晶间孔和粒内溶孔，残余粒间孔多被黏土矿物充填，可见绿泥石薄膜，YQ102 井 2 299.48 m。

图 3 简阳地区须家河组四段致密砂岩储层的储集空间

Fig. 3 Reservoir spaces of the tight sandstone reservoir in the Member 4 of Xujiahe Formation in Jianyang area

不稳定组分如长石、岩屑和方解石等溶蚀而成,多表现为颗粒边缘港湾状或锯齿状粒缘溶孔,分布较少[图 3(b)—图 3(d)]。粒内溶孔多为长石、方解石、岩屑等组分内部经选择性溶蚀形成,呈圆形、条带状和蜂窝状等分布,以纳米级孔隙为主[图 3(b)—图 3(g)],该类孔隙易通过溶蚀作用串联成相对连续的孔喉网络,局部可呈树状或束状分布,从而改善孔隙的有效连通性,显微观察可见几乎完全溶蚀的铸模孔[图 3(b)]。晶间孔由自生矿物(如石英、黏土矿物)在生长中形成,其中,黏土矿物(如绿泥石、伊/蒙混层)晶间孔普遍发育,分布密集,孔径多分布在  $0.01\sim 0.50\ \mu\text{m}$ [图 3(h)、图 3(i)]。不同类型孔隙的发育往往呈现出特定的依存关系,其中,晶间孔与溶蚀孔的发育程度多表现为共存关系,而二者与残余粒间孔的发育程度则呈相反趋势<sup>[29,31]</sup>。各类孔隙在大小分布、连通性等方面存在显著差异。其相对组成的变化是原始沉积与后期成岩作用共同改造的结果,进而形成了复杂多样的孔隙结构网络,网络特征直接决定了储层的物性特征和流体可动性<sup>[29,32-33]</sup>。此外,部分样品中局部可见石英粒缘缝、刚性颗粒破裂缝和晶间缝[图 3(g)],这些微裂缝作为优势运移通道,能够显著提高流体的渗流能力。

### 3.3 孔隙结构与流体赋存空间特征

#### 3.3.1 $T_2$ 谱几何特征

核磁共振实验结果显示,简阳地区须四段致密砂岩的孔隙结构复杂多样,流体饱和态  $T_2$  谱的形态可划分为 4 种类型: I 类(单峰型)的  $T_{2,\text{peak}} < 1\ \text{ms}$ ; II 类(单峰型)的  $T_{2,\text{peak}}$  介于  $1\sim 10\ \text{ms}$ ; III 类(左偏双峰型)的  $T_{2,\text{peak}}$  约为  $1\ \text{ms}$ ; IV 类(右偏双峰型)的  $T_{2,\text{peak}}$  介于  $10\sim 100\ \text{ms}$ (图 4)。由流体饱和态的  $T_2$  谱可计

算得到的储层孔隙结构的几何参数如表 2 所示,其中,偏度( $S_{ks}$ )为  $0.69\sim 0.93$ ,平均为  $0.82$ ,峰度( $K_s$ )和变异系数( $C_s$ )分别为  $1.55\sim 8.24$ (平均为  $2.91$ )和  $0.16\sim 1.35$ (平均为  $1.07$ )。上述参数特征表明,研究区致密砂岩储层的孔隙类型多样,孔隙结构复杂,孔径分布范围广,以小孔占主导。

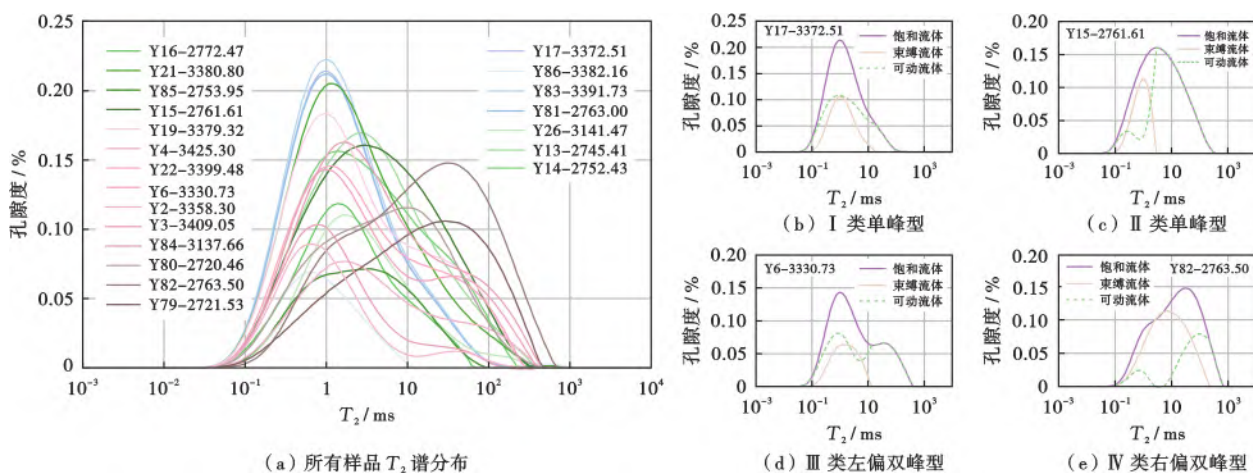
#### 3.3.2 孔径转化

研究所使用的高压压汞仪的最大进汞压力为  $200\ \text{MPa}$ ,可表征的最小孔径约为  $3.7\ \text{nm}$ 。样品进汞曲线整体呈斜直线型,排驱压力变化大,介于  $0.072\sim 0.94\ \text{MPa}$ (平均为  $0.36\ \text{MPa}$ );退汞效率较低,介于  $42.68\%\sim 53.10\%$ (平均为  $49.26\%$ )。综合压汞曲线形态与参数特征(图 5)分析表明,样品孔隙结构的非均质性较强,分选较差,但整体连通性较好。

核磁共振技术具有快速、无损、准确、信息丰富等优势,可同时获取孔隙分布特征、流体赋存及运移状态等关键参数。为更加全面地表征流体与孔隙介质间的关系,可采用高压压汞与核磁共振  $T_2$  谱联合表征的方法,构建孔径分布曲线<sup>[12,14,34-35]</sup>。 $T_2$  与孔隙半径之间的映射关系为:

$$r = C \times T_2^n \quad (6)$$

为获取样品全孔径范围的孔隙分布特征,将高压压汞法测得的孔径分布与核磁共振  $T_2$  谱累积分布曲线进行最小二乘法拟合。拟合中采用压汞测试对应的孔径范围计算转换因子  $C$  和  $n$ <sup>[25-26]</sup>[图 6(a)],进而重构得到样品全孔径尺度的孔隙分布。针对 4 类  $T_2$  分布曲线分别开展计算,并对每类样品的转换因子取平均值。I—IV 类样品的  $C$  值分别为  $5.48, 19.78, 16.02$  和  $41.08$ ,  $n$  值分别为  $0.48, 0.76, 0.76$  和  $0.93$ 。孔径分



注:可动流体曲线为离心前后对应的  $T_2$  幅度差所得。

图 4 简阳地区须家河组四段致密砂岩储层的 4 类核磁共振  $T_2$  谱特征

Fig. 4 Nuclear magnetic resonance  $T_2$  spectrum characteristics of the tight sandstone reservoir in the Member 4 of Xujiahe Formation in Jianyang area

表 2 基于核磁共振实验获得的须家河组四段致密砂岩储层的孔隙结构参数

Table 2 Pore structure parameters of the tight sandstone reservoir in the Member 4 of Xujiahe Formation based on nuclear magnetic experiments

样品号	S <sub>m</sub> /%	S <sub>b</sub> /%	R <sub>cutoff</sub> /μm	饱和流体					可动流体			束缚流体			
				R <sub>shalf</sub> /μm	R <sub>sgeo</sub> /μm	R <sub>speak</sub> /μm	K <sub>s</sub>	S <sub>ks</sub>	C <sub>s</sub>	R <sub>mhalf</sub> /μm	R <sub>mgeo</sub> /μm	R <sub>mpeak</sub> /μm	R <sub>bhalf</sub> /μm	R <sub>bgeo</sub> /μm	R <sub>bpeak</sub> /μm
Y13-2745.41	47.57	52.43	0.081	0.081	0.094	0.069	3.01	0.84	1.10	0.436	0.242	0.610	0.041	0.040	0.049
Y14-2752.43	63.90	36.10	0.030	0.069	0.086	0.030	2.62	0.87	1.22	0.263	0.185	0.222	0.025	0.022	0.030
Y15-2761.61	74.03	25.97	0.021	0.114	0.115	0.081	2.31	0.82	1.14	0.263	0.242	0.081	0.015	0.014	0.021
Y16-2772.47	75.02	24.98	0.011	0.035	0.042	0.030	2.49	0.79	1.15	0.058	0.054	0.069	0.015	0.018	0.018
Y17-3372.51	63.96	36.04	0.015	0.057	0.070	0.026	2.82	0.78	1.01	0.074	0.097	0.026	0.034	0.039	0.034
Y19-3379.32	82.99	17.01	0.008	0.056	0.090	0.024	3.35	0.91	1.22	0.066	0.103	0.017	0.056	0.045	0.092
Y2-3358.30	81.92	18.08	0.005	0.020	0.028	0.015	8.24	0.80	1.13	0.024	0.031	0.015	0.015	0.016	0.015
Y21-3380.80	73.69	26.31	0.011	0.041	0.053	0.025	3.46	0.85	1.08	0.081	0.077	0.134	0.018	0.018	0.021
Y22-3399.48	80.80	19.20	0.011	0.078	0.107	0.029	2.92	0.90	1.23	0.129	0.150	0.024	0.029	0.026	0.040
Y26-3141.47	68.44	31.56	0.021	0.058	0.069	0.041	3.21	0.80	0.94	0.134	0.103	0.134	0.030	0.029	0.035
Y3-3409.05	81.09	18.91	0.005	0.024	0.033	0.017	4.81	0.83	1.07	0.029	0.038	0.024	0.015	0.019	0.012
Y4-3425.30	64.41	35.59	0.040	0.109	0.156	0.047	3.32	0.90	1.20	0.251	0.235	0.015	0.078	0.075	0.066
Y6-3330.73	69.57	30.43	0.020	0.078	0.124	0.024	3.27	0.93	1.35	0.152	0.200	0.020	0.040	0.042	0.040
Y79-2721.53	56.98	43.02	0.201	0.303	0.251	0.690	1.55	0.77	1.11	1.041	0.731	1.195	0.058	0.060	0.067
Y80-2720.46	60.32	39.68	0.051	0.101	0.093	0.230	1.77	0.78	1.05	0.303	0.168	0.399	0.039	0.039	0.044
Y81-2763.00	44.95	55.05	0.074	0.057	0.070	0.026	2.82	0.78	1.01	0.020	0.036	0.009	0.126	0.137	0.057
Y82-2763.50	35.68	64.32	0.690	0.347	0.275	0.791	1.75	0.78	1.17	1.572	0.813	2.721	0.153	0.150	0.153
Y83-3391.73	48.20	51.80	0.057	0.057	0.070	0.026	2.82	0.78	1.01	0.015	0.022	0.012	0.214	0.202	0.214
Y84-3137.66	61.44	38.56	0.047	0.109	0.156	0.047	3.32	0.90	1.20	0.350	0.348	1.574	0.040	0.043	0.034
Y85-2753.95	76.44	23.56	0.013	0.058	0.063	0.096	1.63	0.76	0.82	0.114	0.101	0.188	0.013	0.013	0.011
Y86-3382.16	60.97	39.03	0.007	0.015	0.021	0.012	1.60	0.69	0.16	0.012	0.015	0.015	0.057	0.063	1.045

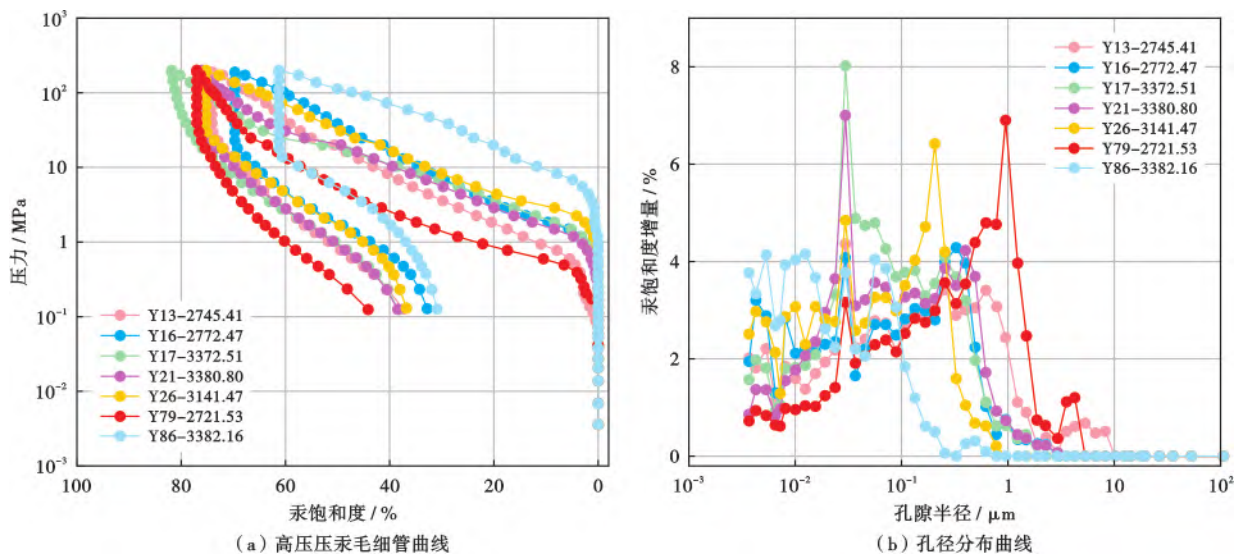


图 5 简阳地区须家河组四段毛细管压力曲线及孔径分布特征

Fig. 5 Capillary pressure curves and pore size distribution characteristics of the Member 4 of Xujiahe Formation in Jianyang area

布结果表明,微米—纳米级孔隙在样品中广泛发育,其中,纳米级孔隙是主要的储集空间[图 5(b)、图 6(b)],其孔径主要分布在 0.01~0.50 μm,整体呈现出复杂多样的分布特征。

3.3.3 孔隙分形特征

基于几何分形理论,笔者采用式(3)分别计算了流体饱和态 T<sub>2</sub> 谱和可动流体 T<sub>2</sub> 谱对应的分形维数,用以表征致密砂岩微观孔隙结构的非均质性。受复杂孔隙结构控制,流体饱和态 T<sub>2</sub> 谱与可动流体 T<sub>2</sub> 谱在不同孔径范围内均呈现出明显的分形特征(图 7)。结合

分段的分形特征与储集空间类型<sup>[35-36]</sup>,须四段砂岩储层的孔隙可以划分为微孔(孔径为 0~0.01 μm)、小孔(孔径为 0.01~0.10 μm)、中孔(孔径为 0.10~1.00 μm)和大孔(孔径>1.00 μm)4 类。分形结果表明:大孔区间的流体饱和态 T<sub>2</sub> 谱与可动流体 T<sub>2</sub> 谱对应的分形维数分别为 2.86~3.00(平均为 2.95)和 2.69~3.00(平均为 2.92),明显高于中孔区间流体饱和态 T<sub>2</sub> 谱对应的分形维数(2.66~2.95,平均为 2.83)和可动流体 T<sub>2</sub> 谱对应的分形维数(2.17~2.96,平均为 2.76),以及小孔区间流体饱和态 T<sub>2</sub> 谱对应的分形维数(2.34~

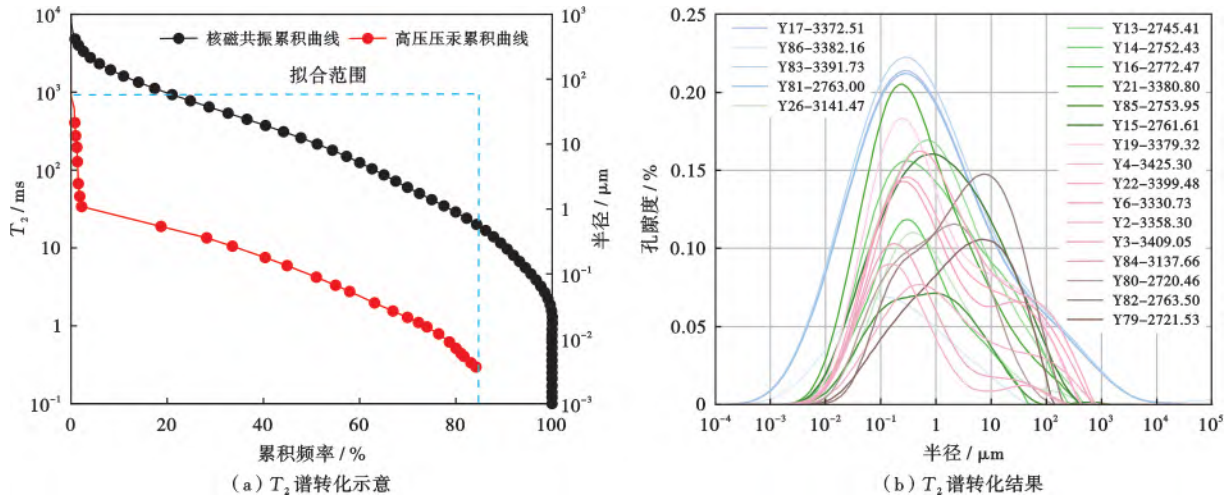


图6 核磁共振  $T_2$  谱的孔径转化分析

Fig. 6 Analysis of pore size conversion from nuclear magnetic resonance  $T_2$  spectra

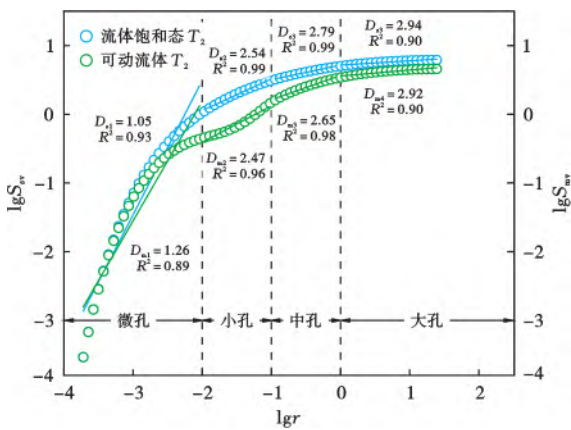


图7 流体饱和态  $T_2$  谱和可动流体  $T_2$  谱的分段分形维数

Fig. 7 Fractal dimensions of segmented pore intervals based on saturated and movable fluid  $T_2$  spectra

2.76, 平均为 2.55) 和可动流体  $T_2$  谱对应的分形维数 (2.44~2.99, 平均为 2.67); 微孔区间的流体饱和态  $T_2$  谱与可动流体  $T_2$  谱对应的分形维数分别为 0.30~1.81 (平均为 1.06) 和 0.60~1.88 (平均为 1.19), 说明微孔尺度不具备几何分形意义。整体上, 随着孔径增大, 孔隙结构的非均质性增强。此外, 与饱和流体的赋存空间相比, 可动流体在中孔和大孔尺度的非均质性有所减弱, 而在小孔尺度的非均质性相对增强。

3.3.4 可动流体分布特征

在饱和流体的条件下, 研究区致密砂岩孔径分布的中值半径和几何均值半径分别为  $0.015 \sim 0.347 \mu\text{m}$  和  $0.021 \sim 0.275 \mu\text{m}$ 。致密砂岩的储集空间多以小孔为主, 中孔次之 (表 2)。结合扫描电镜和铸体薄片分析, 不同尺度孔隙的发育特征 (图 8) 表现为: 微孔以长石粒内溶孔为主, 形态多呈圆形和椭圆形, 占比为

6.64%~41.72% (平均为 20.20%); 小孔主要为黏土矿物晶间孔和长石粒内溶孔, 多呈圆形、狭缝形和三角形, 占比为 23.74%~49.62% (平均为 37.12%); 中孔主要为长石、石英粒内溶孔和黏土矿物晶间孔, 多呈圆形、方形和三角形等, 占比为 11.54%~39.57% (平均为 25.82%); 大孔主要为残余粒间孔、粒间溶孔和沿矿物解理缝溶蚀形成的溶蚀扩大孔, 呈港湾状、不规则状分布, 占比为 5.19%~30.95% (平均为 16.85%), 整体发育程度较低。

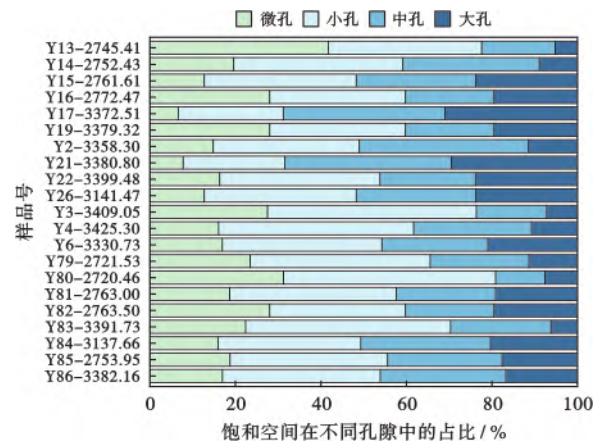


图8 基于流体饱和态  $T_2$  谱的不同尺度孔隙分布

Fig. 8 Distribution of different scaled pores based on saturated fluid  $T_2$  spectra

研究区样品中流体的可动性差异显著 (图 9), 可动流体饱和度为 35.68%~82.99%, 平均为 65.35%。可动流体主要赋存于小孔 (占比为 0.73%~38.85%, 平均为 19.12%), 其次为中孔 (占比为 4.60%~31.70%, 平均为 18.13%); 束缚流体主要赋存于小孔 (占比 10.15%~32.74%, 平均为 18.00%)。可动流体与束缚流体的中值半径分别为  $0.012 \sim 1.572 \mu\text{m}$  (平均为

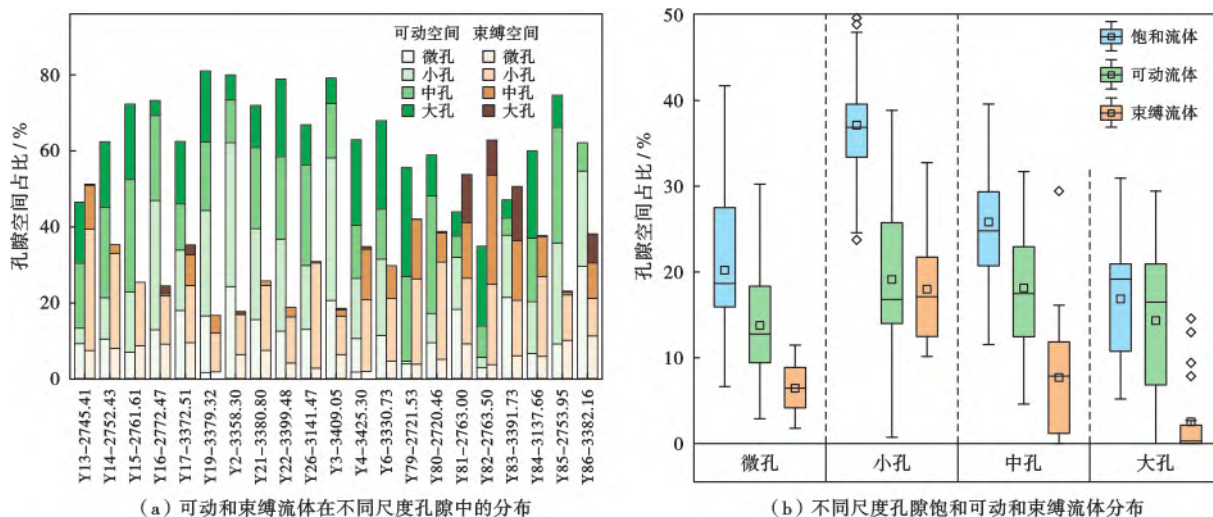


图 9 不同尺度孔隙下饱和和流体、可动流体和束缚流体的分布特征

Fig. 9 Distribution characteristics of saturated, movable and irreducible fluids in different scaled pores

0.256 μm)和 0.013~0.214 μm(平均为 0.053 μm);几何均值半径分别为 0.015~0.813 μm(平均为 0.190 μm)和 0.013~0.202 μm(平均为 0.053 μm)。

基于理想双峰模型的 T<sub>2</sub> 截止值可划分可动流体和束缚流体的界限,此界限常用于表征岩心中可动流体对应的最小孔隙半径。传统观点<sup>[16,18,20]</sup>认为大孔内的流体均为可动流体,小孔内的流体均为束缚流体, T<sub>2</sub> 截止值的大小往往受岩石类型、孔隙结构等因素控制。对于强非均质性的致密储层,依据 T<sub>2</sub> 截止值,流体的赋存空间可划分为 4 个区域(图 10 中的 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>、S<sub>3</sub> 和 S<sub>4</sub>),其中, S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 属于可动流体区, S<sub>3</sub> 和 S<sub>4</sub> 属于束缚流体区。图 10 中 S<sub>1</sub> 区域内的可动流体占比为 8.02%~35.86%,平均为 17.50%,不可忽视。尽管 T<sub>2</sub> 截止值并非绝对的物理分界点,仅依靠该参数无法完全精确区分可动流体与束缚流体的赋存空间,但其仍是表征致密砂岩流体可动性的关键参数<sup>[16,20]</sup>。

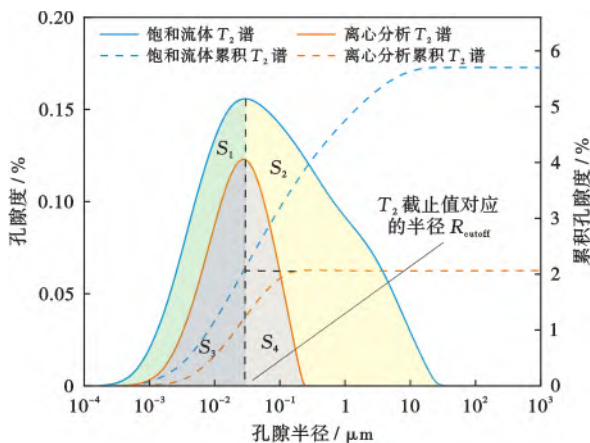


图 10 T<sub>2</sub> 截止值的判别

Fig. 10 Identification of T<sub>2</sub> cutoff value

### 4 讨论

#### 4.1 储层物性与流体可动性

储层物性分析结果[图 11(a)、图 11(b)]显示,简阳地区致密砂岩的孔隙度和渗透率主要受大孔发育程度控制,对应以粒间孔为主且伴随裂缝发育的孔隙系统。此外,以次生溶孔为主的中孔也与渗透率呈正相关关系,这说明溶蚀作用形成的复杂孔隙网络同样是很重要的渗流通道。笔者选取可动流体饱和度和可动流体中值半径作为关键参数,系统表征了致密砂岩储层中流体的可动性。与常规储层物性与流体可动性普遍呈正相关的特征不同<sup>[37]</sup>,致密砂岩储层受强烈微观非均质性影响,其储层物性与流体可动性表现出显著的分异特征[图 11(c)、图 11(d)]。具体而言,可动流体饱和度与孔隙度、渗透率均呈微弱负相关关系,而可动流体中值半径则与渗透率呈正相关性,与孔隙度的相关性不显著。上述特征的成因在于,研究区储层内的可动流体主要受以晶间孔和粒内溶孔为主的小孔占比控制。随着孔隙度和渗透率的增大,小孔所占的比例相对降低,可动流体的主要赋存空间减少,进而导致可动流体饱和度下降。与此同时,大孔占比升高,可动流体中值半径相应增大<sup>[29]</sup>,流体在较大孔隙(裂缝)中所受到的毛细管阻力的束缚作用较弱,整体可动性增强。该认识揭示了不同尺度孔隙对储层物性与流体可动性的差异化控制机制,明确了微观孔隙结构在致密砂岩储层流体赋存与运移行为中的主导作用。

#### 4.2 孔隙结构与流体可动性

##### 4.2.1 不同尺寸的孔隙占比

不同尺度孔隙对流体可动性的控制作用存在明显

差异<sup>[33,36]</sup>(图 12)。具体表现为,可动流体饱和度与小孔占比比较显著的正相关性,而与大孔占比呈弱负相关性。这说明形态相对规则、非均质性较弱的小孔是研究区主要的可动流体储集空间。相比之下,可动流体中值半径与微孔占比和小孔占比呈负相关,而与中

孔占比和大孔占比呈正相关,这反映了在较小尺度的孔隙中毛细管阻力的束缚作用更强。

综合分析表明:渗透率主要受少量连通大孔或裂缝构成的优势渗流通道控制,因而与大孔占比呈显著的正相关;可动流体饱和度主要受控于由小孔与中孔

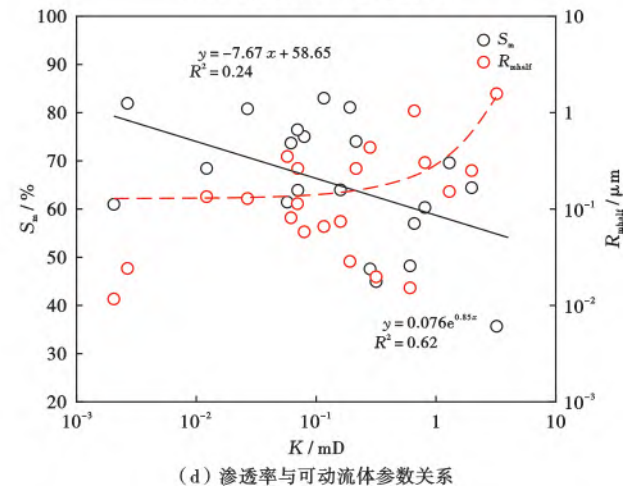
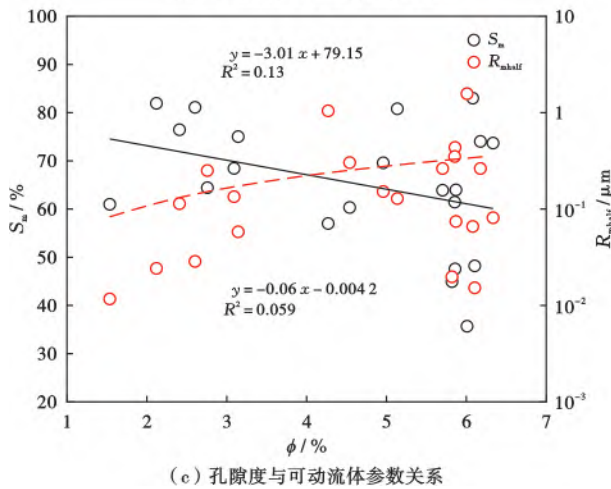
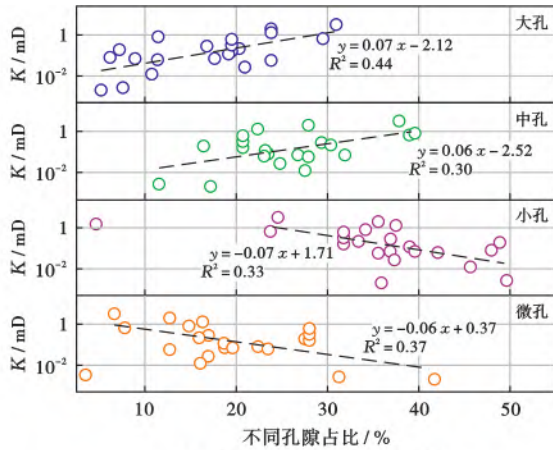
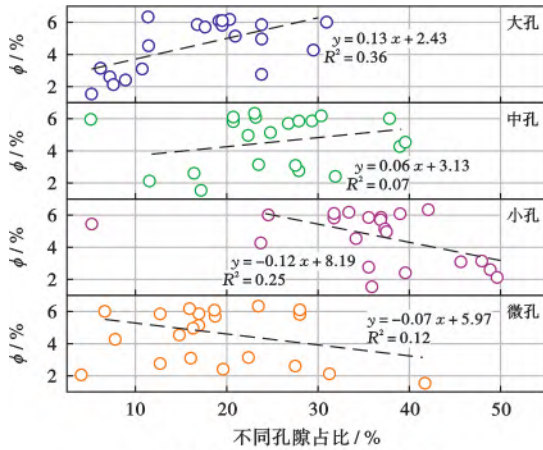


图 11 储层物性与孔隙发育特征及流体可动性参数的关系

Fig. 11 Relationship between reservoir physical properties and pore development characteristics, as well as fluid mobility parameters

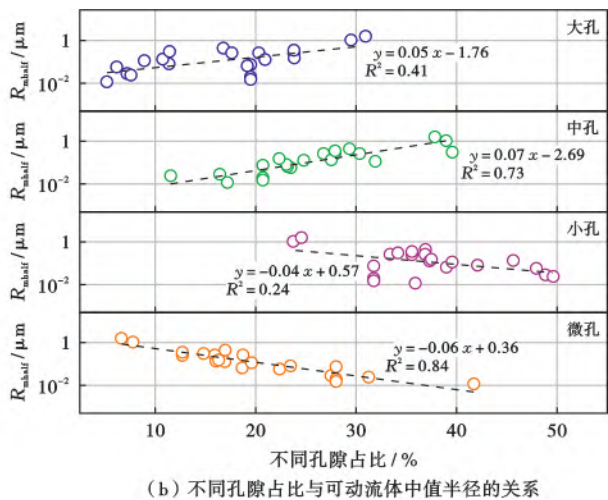
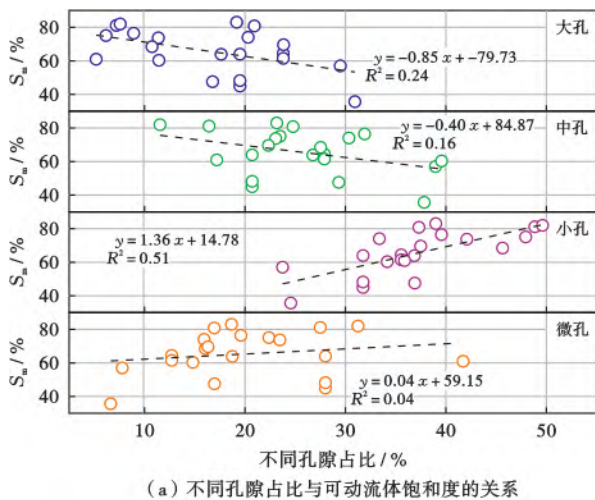


图 12 不同尺度孔隙占比与流体可动性参数关系

Fig. 12 Relationship between different pore proportions and fluid mobility parameters

组成的基质孔隙网络的发育规模与连通性。大孔占比与可动流体饱和度呈弱负相关,其内在机理在于部分大孔以孤立的“墨水瓶孔”形式存在,或受胶结作用被强烈充填、堵塞,而连通性较好的微孔、小孔的孔隙网络则相对不发育。这表明在强非均质致密砂岩储层中,仅依靠渗透率或大孔占比难以对储层的有效性进行全面、客观地评价。

4.2.2 孔隙结构参数

流体可动性参数与孔隙结构参数的相关性分

析(图 13)显示,可动流体饱和度与  $T_2$  截止值呈显著的负相关。 $T_2$  截止值降低,意味着更多赋存在微孔—小孔中的流体在离心力作用下可被界定为可动流体,这指示致密储层中发育孔径虽小但形态相对规则或连通性较好的微孔—小孔体系,其内部流体能够在离心条件下克服毛细管阻力发生流动。可动流体饱和度与饱和流体的中值半径、几何均值半径和峰值半径均呈一定的负相关关系,说明当孔隙系统整体以小孔为主时,可动流体饱和度呈增大趋势。这进一步证实不同

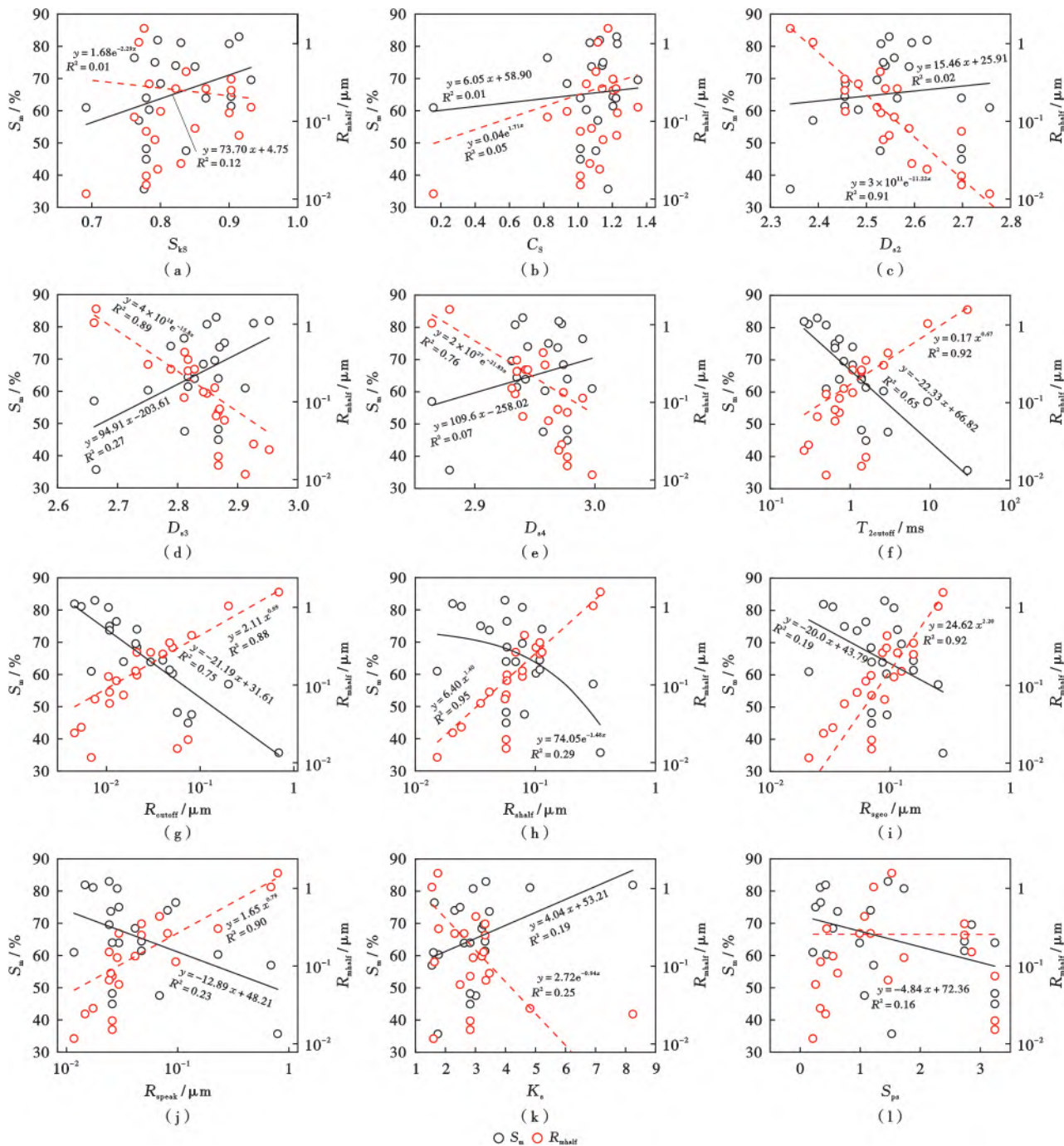


图 13 孔隙结构参数与流体可动性参数的相关性

Fig. 13 Correlation between pore structure parameters and fluid mobility parameters

尺度孔隙的占比较单一孔径参数对流体赋存与运移行为的控制更为关键。中孔的分形维数与可动流体饱和度呈正相关关系,表明在该尺度内由次生溶蚀作用形成的复杂孔隙网络尽管形态多样,但整体具有较好的连通性。中孔作为重要的渗流通道[图 11(b)],其非均质性增强本质上是有效孔隙网络发育的体现,通过与微孔、小孔有效连通,共同提升了可动流体饱和度。可动流体中值半径与饱和流体的孔径相关参数呈高度正相关,而与其分形维数呈显著负相关,说明可动流体中值半径的大小同时受孔径分布特征与孔隙结构非均质性共同控制,体现了可动流体赋存空间对孔隙几何形态与结构复杂度的双重响应。

#### 4.3 矿物组成与流体的可动性

不同的矿物组分在成岩作用的差异改造下会形成多种孔隙类型的空间组合,进而制约储层的孔隙结构,并间接影响流体的可动性<sup>[18,29,38]</sup>(图 3,图 14)。分析表明,可动流体饱和度与石英含量呈负相关。这一方

面是由于石英构建了以大孔为主的粒间孔的基本骨架,而大孔并非致密储层中可动流体的主要赋存空间;另一方面,研究区的致密储层中普遍发育石英次生加大作用,可显著堵塞孔隙,减少储集空间并降低孔隙连通性。可动流体饱和度与高岭石、绿泥石含量呈正相关,这与黏土矿物晶间孔是小孔体系的重要组成部分有关,因为小孔是可动流体的主要赋存空间。值得注意的是,绿泥石薄膜的发育能够有效抑制石英的次生加大作用<sup>[10]</sup>,这在一定程度上可保存原生粒间孔并改善孔隙的连通性,是绿泥石含量与可动流体饱和度呈正相关的重要原因。可动流体中值半径随石英含量增加而增大,这反映出石英所伴生的粒间孔系统通常具有较大的孔隙半径。而可动流体中值半径与碳酸盐矿物和高岭石含量呈负相关性,这是由于胶结作用会堵塞孔隙,高岭石晶间孔以较小孔隙为主。而长石的溶蚀会形成多尺度孔隙,其对流体可动性的影响复杂,因此其与可动性参数间未表现出明显的相关性。

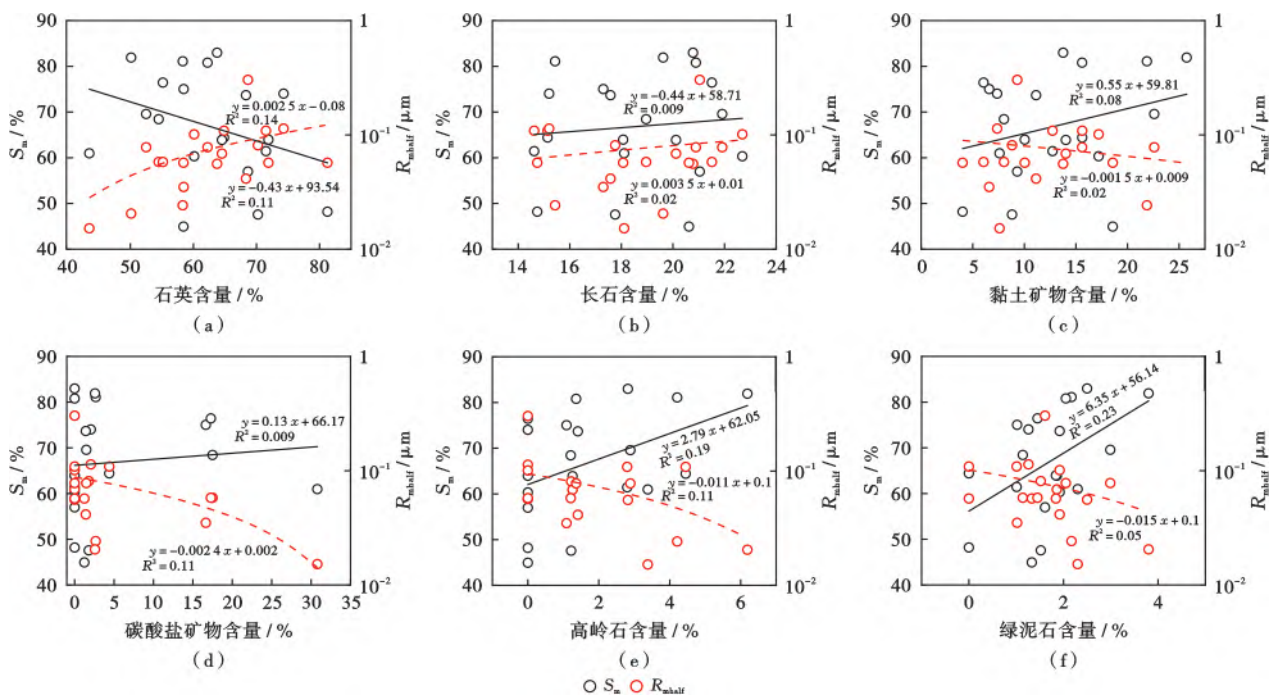


图 14 不同矿物含量与流体可动性参数相关性

Fig. 14 Correlation between minerals contents and fluid mobility parameters

#### 4.4 流体可动性敏感因子的确定

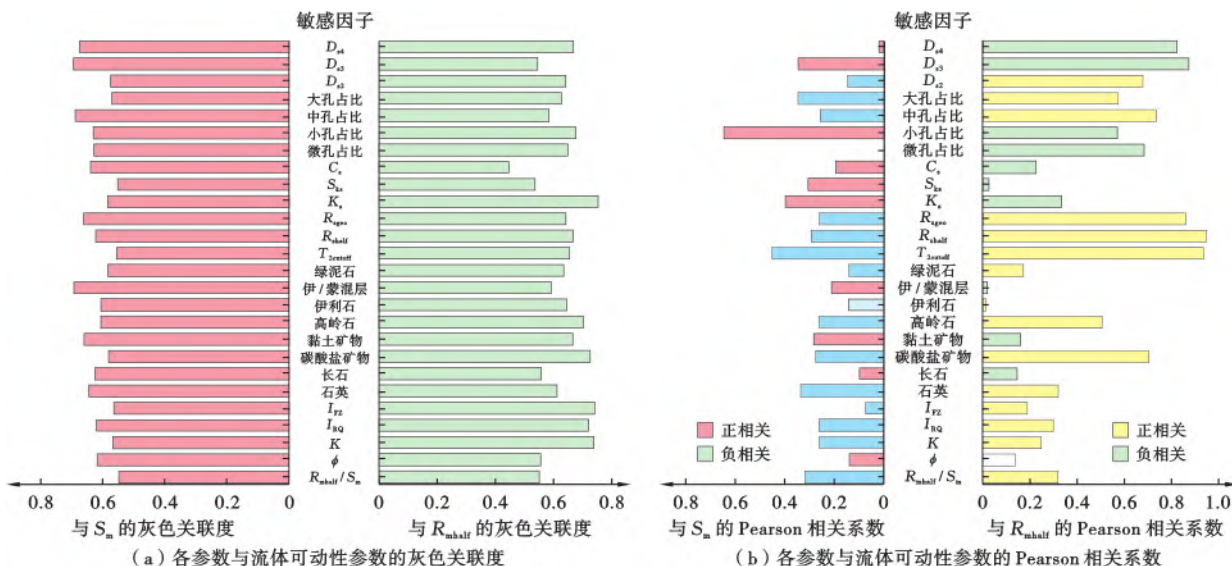
流体的可动性受多尺度、多类型因素协同控制,既包括宏观物性参数,也涵盖微观尺度下不同孔隙占比、孔隙结构参数、分形维数及矿物组成等。宏观物性参数本质上是微观孔隙结构的综合反映,矿物组分通过成岩作用控制孔隙类型与空间配置,而孔隙结构则直接决定了可动流体的赋存状态<sup>[18,29,34-35,39]</sup>。此外,矿物表面润湿性的差异可直接影响束缚水膜的厚度,进

而影响流体的可动性<sup>[12,40-41]</sup>。这些因素相互交织、错综复杂,呈现出多维度、非线性的相关性,传统单一分析方法难以有效地解析出流体可动性关键敏感因子与主控因素。为此,笔者构建了多方法融合分析框架,集成 Pearson 相关分析(线性关系)、灰色关联法(非线性关系)和随机森林算法(量化特征重要性),系统识别影响流体可动性参数(如可动流体中值半径、可动流体饱和度)的关键敏感因子,揭示各影响因素的控制层级,

并量化其重要性权重。

基于 Pearson 相关分析和灰色关联法的初步筛选,结合随机森林算法评估特征重要性,笔者确立了以孔隙结构为主导的流体可动性敏感因子体系(图 15)。在构建因子候选集时,针对可动流体饱和度和可动流体中值半径分别采用差异化筛选策略<sup>[5,10,42]</sup>:前者以灰色关联度 $\geq 0.6$ 且 Pearson 相关系数的绝对值 $(|R|) \geq 0.2$ 为主要筛选规则,兼顾非线性关联与基本线性相关性,同时将 $|R| \geq 0.4$ 的强线性相关参数作为次要规则;后者采用 $|R| \geq 0.7$ 为主规则,筛选极强线性相关因子,并以灰色关联度 $\geq 0.7$ 的高关联参数作为次要

补充,兼顾强线性相关与高非线性关联特征。候选因子的冲突处理遵循主规则优先、次要规则补充的原则,以确保候选因子的全面性和代表性。将筛选所得参数输入随机森林算法模型,分析结果(图 16)表明:孔隙结构参数对流体可动性参数的贡献度超过 90%,而矿物组分的直接影响相对有限。可动流体饱和度的核心敏感因子为小孔占比(重要性为 0.379)和  $T_2$  截止值(重要性为 0.372),二者合计的贡献度达 75.1%。其中,小孔占比主导了可动流体的储集空间规模,而  $T_2$  截止值的降低则反映有更多的微孔、小孔流体在离心条件下可动。可动流体中值半径的敏感因子为饱和和流体



注:当灰色关联度 $>0.6$ 时认为相关性强<sup>[42]</sup>;根据 Pearson 相关系数的绝对值 $|R|$ 可以划定基本不相关( $0.01 \leq |R| < 0.2$ )、弱相关( $0.2 \leq |R| < 0.3$ )、中等相关( $0.3 \leq |R| < 0.4$ )、强相关( $0.4 \leq |R| < 0.7$ )和极强相关( $0.7 \leq |R| \leq 1$ )<sup>[5,10]</sup>。

图 15 敏感因子与流体可动性参数的相关性

Fig. 15 Correlation between sensitive factors and fluid mobility parameters

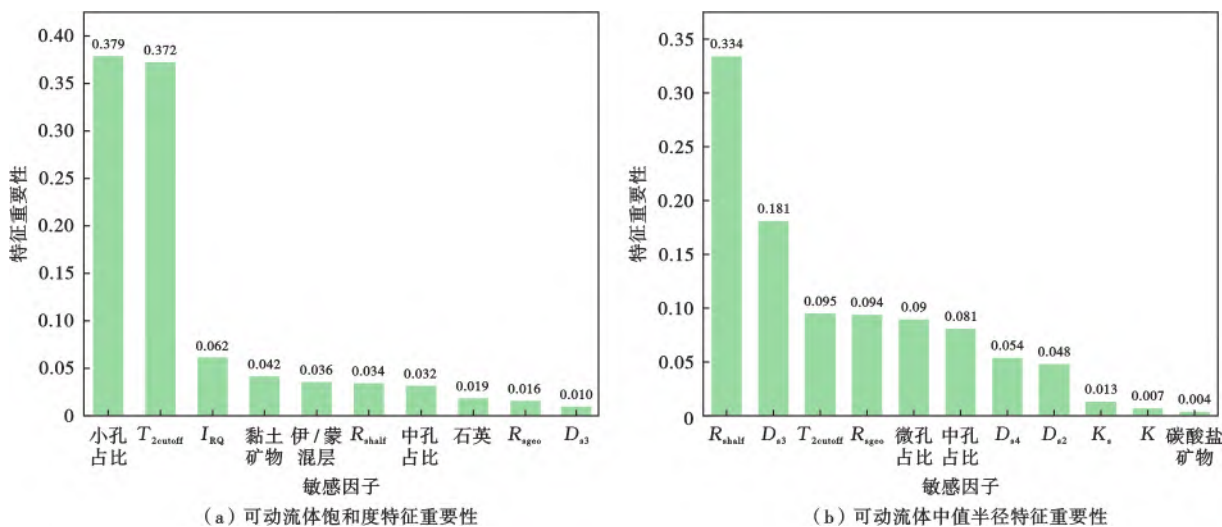


图 16 随机森林算法量化的特征重要性评估

Fig. 16 Feature importance assessment quantified by Random Forest algorithm

中值半径(重要性为 0.334)和中孔分形维数(重要性为 0.181),二者合计的贡献度达 51.5%。饱和流体中值半径可直接表征可动流体赋存空间的整体尺度,而中孔分形维数则反映中孔系统由溶蚀作用所形成的复杂孔隙网络的非均质性,二者分别从宏观孔径分布与微观结构形态两方面协同控制可动流体的空间分布特征。

为验证多方法融合框架的合理性与优势,笔者对 Pearson 相关分析、灰色关联法和随机森林算法 3 种方法的识别结果进行了系统对比。对于可动流体饱和度,小孔占比在 3 种方法中表现一致( $|R|$ 为 0.646、灰色关联度为 0.648、随机森林算法的特征重要性为 0.379), $T_2$  截止值同样表现稳定( $|R|$ 为 0.451,灰色关联度为 0.607,随机森林算法的特征重要性为 0.372),这进一步验证了关键敏感因子的可靠性。值得注意的是,中孔分形维数与可动流体饱和度的关系呈显著的非线性特征,其  $|R|$  仅为 0.345,但灰色关联度达 0.667,表明线性分析可能低估其作用。对于可动流体中值半径,饱和流体中值半径在 Pearson 相关分析( $|R|$ 为 0.947)和随机森林算法(重要性为 0.334)中的评价结果均居首位,灰色关联度为 0.647; $T_2$  截止值与可动流体中值半径的灰色关联度最高(0.747), $|R|$ 达 0.937,但随机森林算法的特征重要性仅为 0.095,反映出变量间存在高度共线性,随机森林算法在特征重要性评价中将权重优先分配给了饱和流体中值半径。因此,线性主导因素在 3 种方法中的识别结果具有较高的一致性,而非线性主导因素及高度共线性变量则需结合灰色关联度与随机森林算法进行识别与量化。该框架兼顾了线性关系、非线性关联及特征交互的影响,为主控因素识别提供了更可靠的方法学支撑。

上述定量分析结果为理解致密砂岩储层中流体可动性的控制机制提供了数据基础。从孔隙尺度的流体动力学角度,毛细管力是控制流体可动性的关键物理边界条件,孔隙结构参数则是该边界条件的量化表征。在研究区的致密砂岩储层中,小孔与中孔构成的管束状网络因毛细管力适中、连通性较好,成为可动流体赋存的主要空间;部分大孔虽孔径较大,但因其数量少且部分呈孤立分布或喉道细小而使得流体的流动受限。这表明决定流体可动性的关键并非单一孔径大小,而是孔隙网络的整体连通性。矿物对流体可动性的间接影响主要体现在其通过多期成岩作用改造孔隙结构,进而影响流体可动性。成岩作用晚期会发生胶结作用,导致方解石充填孔隙、堵塞喉道;长石因溶蚀作用而形成的次生孔隙需连通有效喉道才能赋存可动流体。成岩过程中的压实作用会造成“减孔压喉”的不可逆影响,而胶结作用-溶蚀作用-压实作用的动态平衡

则共同决定了储层孔隙结构的最终状态。随机森林算法的分析结果显示,矿物组成的特征重要性整体低于孔隙结构参数。需要指出的是,随机森林算法的特征重要性是预测贡献度而非单一因果强度,其定量分析结果与地质过程的解释成果具有良好的一致性。

3 种方法的一致性验证与地质分析共同表明,孔隙结构参数(小孔占比、饱和流体中值半径、中孔分形维数等)是控制流体流动的核心敏感因子,矿物组分主要通过改变孔隙结构间接影响流体的可动性,整体表现为“孔隙结构主导,矿物组分间接影响”的特征。笔者构建的多方法融合框架可识别出控制流体可动性的关键孔隙结构参数,建立相应的敏感因子体系,为强非均质储层的有效性评价提供新的微观定量判识依据。在实际勘探工作中,应重点关注反映小孔—中孔基质孔隙网络连通性与规模的关键参数。研究者可基于已识别的关键参数与流体可动性之间的量化关系,构建可解释的数理预测模型,由此推动微观认识向宏观预测转化。

## 5 结 论

(1) 四川盆地简阳地区须四段致密储层的孔隙类型多样、结构复杂。基于孔隙类型、孔径分布和几何分形特征,致密储层的孔隙可划分为微孔(以长石或方解石的粒内溶孔为主)、小孔(以黏土矿物晶间孔和粒内溶孔为主)、中孔(以粒内溶孔和黏土矿物晶间孔为主)和大孔(主要为残余粒间孔及溶蚀扩大孔)。小孔、中孔和大孔均具有分形特征,且孔隙尺度越大,非均质性越强。可动流体在中孔—大孔尺度上分布的非均质性弱于饱和流体,而在小孔尺度上则相反,反映出不同尺度孔隙对流体赋存状态的差异控制。小孔和中孔是流体的主要赋存空间,而少量连通的大孔及裂缝则是流体的关键渗流通道,二者共同决定了致密砂岩储层的储集与渗流能力。

(2) 致密砂岩储层中的可动流体主要赋存于小孔(占比为 0.73%~38.85%,平均为 19.12%)与中孔(为 4.60%~31.70%,平均为 18.13%),而束缚流体则集中分布于小孔(占比为 10.15%~32.74%,平均为 18.00%),小孔的占比是控制流体可动性的关键参数。简阳地区须四段致密储层的可动流体中值半径(平均为 0.256  $\mu\text{m}$ )显著大于束缚流体(平均为 0.053  $\mu\text{m}$ ),表明该套储层的可动流体分布于相对更大的孔隙空间,但均属于小孔—中孔孔隙系统。

(3) 基于 Pearson 相关分析、灰色关联法与随机森林算法相融合的多方法评价框架,通过线性统计、非线性关联与特征重要性的互补验证,实现了对流体可

动性参数影响因素的定量筛选与权重分析。孔隙结构参数(小孔占比、饱和流体中值半径、中孔分形维数等)是控制流体可动性的核心敏感因子;伊/蒙混层、碳酸盐矿物等组分主要通过改造孔隙结构而间接影响流体的可动性,其直接贡献较弱。数据驱动的定量分析结果与地质机理的阐释相互印证,明确了简阳地区“孔隙结构主导”的流体可动性量化控制模式,为致密砂岩储层的流体可动性评价与优质储层预测提供了定量指标与理论依据。

符号注释: $T_2$ —横向弛豫时间,ms; $T_{2B}$ —体相弛豫时间,ms; $T_{2S}$ —表面弛豫时间,ms; $T_{2D}$ —扩散弛豫时间,ms; $T_{2max}$ —最大横向弛豫时间,ms; $T_{2cutoff}$ — $T_2$ 截止值; $T_{2,peak}$ — $T_2$ 谱峰值,ms; $\rho$ —表面弛豫率, $\mu\text{m}/\text{ms}$ ; $S$ —孔隙表面积, $\mu\text{m}^2$ ; $V$ —孔隙体积, $\mu\text{m}^3$ ; $D_f$ —流体扩散系数, $\mu\text{m}^2/\text{ms}$ ; $\gamma$ —旋磁比,MHz/T; $G$ —磁场强度,T; $T_E$ —回波时间,ms; $r$ —孔隙半径, $\mu\text{m}$ ; $N$ —孔隙数; $r_{max}$ —最大孔隙半径, $\mu\text{m}$ ; $P(r)$ —孔径分布密度函数; $D$ —分形维数; $D_{s1}$ 、 $D_{s2}$ 、 $D_{s3}$ 和 $D_{s4}$ —流体饱和态 $T_2$ 谱在微孔、小孔、中孔和大孔区间的分形维数; $D_{m1}$ 、 $D_{m2}$ 、 $D_{m3}$ 和 $D_{m4}$ —可动流体 $T_2$ 谱在微孔、小孔、中孔和大孔区间的分形维数; $S_v$ —累积孔隙体积分数; $S_{sv}$ —饱和流体的累积孔隙体积分数; $S_{mv}$ —可动流体的累积孔隙体积分数; $K$ —渗透率,mD; $\phi$ —孔隙度; $C$ 、 $n$ —转化因子; $I_{RQ}$ —储层质量指数; $I_{FZ}$ —储层流动指数; $S_{ks}$ —偏度; $K_s$ —峰度; $C_s$ —变异系数; $C$ 、 $n$ — $T_2$ 与孔隙半径之间映射的转换因子; $S_m$ —可动流体饱和度; $S_b$ —束缚流体饱和度; $R_{cutoff}$ — $T_2$ 截止值对应的半径, $\mu\text{m}$ ; $R_{shalf}$ 、 $R_{sgeo}$ 和 $R_{speak}$ —饱和流体的中值半径、几何均值半径和峰值半径, $\mu\text{m}$ ; $R_{mbhalf}$ 、 $R_{mgeo}$ 和 $R_{mpeak}$ —可动流体的中值半径、几何均值半径和峰值半径, $\mu\text{m}$ ; $R_{bahlf}$ 、 $R_{bgeo}$ 和 $R_{bpeak}$ —束缚流体的中值半径、几何均值半径和峰值半径, $\mu\text{m}$ ; $R$ —Pearson相关系数; $R^2$ —相关性的判定系数; $S_{ps}$ —分选系数。

#### 参 考 文 献

- [1] 戴金星,倪云燕,吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.  
DAI Jinxing, NI Yunyan, WU Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.
- [2] 贾爱林,位云生,郭智,等. 中国致密砂岩气开发现状与前景展望[J]. 天然气工业,2022,42(1):83-92.  
JIA Ailin, WEI Yunsheng, GUO Zhi, et al. Development status and prospect of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 83-92.

- [3] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报,2012,33(2):173-187.  
ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [4] 文龙,张本健,金值民,等. 四川盆地陆相全油气系统成藏序列与勘探领域[J]. 石油勘探与开发,2024,51(5):997-1007.  
WEN Long, ZHANG Benjian, JIN Zhimin, et al. Accumulation sequence and exploration domain of continental whole petroleum system in Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(5): 997-1007.
- [5] HUO Lina, JIANG Fujie, CAO Liu, et al. A novel explainable hybrid model for permeability prediction of tight sandstone using PI-DeepFm machine learning algorithm[J]. Water Resources Research, 2025, 61(7): e2024WR038379.
- [6] CAO Liu, JIANG Fujie, CHEN Zhangxing, et al. Data-driven interpretable machine learning for prediction of porosity and permeability of tight sandstone reservoir[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2025, 16(1): 21-35.
- [7] 金值民,杨跃明,罗冰,等. 四川盆地天府气田简阳区须四段致密砂岩储层特征及主控因素[J]. 中国石油勘探,2025,30(02):25-41.  
JIN Zhimin, YANG Yueming, LUO Bing, et al. Characteristics and main controlling factors for tight sandstone reservoirs in the fourth Member of Xujiahe Formation in Jianyang block, Tianfu gas field, Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2025, 30(02): 25-41.
- [8] HUANG Hexin, SUN Wei, JI Wenming, et al. Effects of pore-throat structure on gas permeability in the tight sandstone reservoirs of the Upper Triassic Yanchang Formation in the Western Ordos Basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 162: 602-616.
- [9] QIAO Juncheng, ZENG Jianhui, CAI Jianchao, et al. Pore-scale heterogeneity of tight gas sandstone: origins and impacts[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 96: 104248.
- [10] SONG Zezhang, LV Mingyang, ZHAO Libin, et al. A novel bound water occurrence model for tight sandstone[J]. Fuel, 2024, 357: 130030.
- [11] DONG Xu, SHEN L W, LIU Xuefeng, et al. NMR characterization of a tight sand's pore structures and fluid mobility: an experimental investigation for CO<sub>2</sub> EOR potential[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 118: 104460.
- [12] MENG Ziyuan, SUN Wei, LIU Yiqun, et al. Effect of pore networks on the properties of movable fluids in tight sandstones from the perspective of multi-techniques[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 201: 108449.
- [13] FENG Dehao, LIU Chenglin, FENG Xiaolong, et al. Movable fluid evaluation of tight sandstone reservoirs in lacustrine delta front setting: occurrence characteristics, multiple control factors, and prediction model[J]. Marine and Petroleum Geology, 2023,

- 155:106393.
- [14] JIANG Fujie, HUO Lina, CHEN Di, et al. The controlling factors and prediction model of pore structure in global shale sediments based on random forest machine learning[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 241:104442.
- [15] 周能武, 卢双舫, 张鹏飞, 等. 致密气充注聚集机理及数理模型[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(6):1233-1244.  
ZHOU Nengwu, LU Shuangfang, ZHANG Pengfei, et al. Tight gas charging and accumulation mechanisms and mathematical model[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(6):1233-1244.
- [16] WANG Fuyong, ZENG Faochao. Novel insights into the movable fluid distribution in tight sandstones using nuclear magnetic resonance and rate-controlled porosimetry[J]. *Natural Resources Research*, 2020, 29(5):3351-3361.
- [17] ZHANG Quanpei, LIU Yichang, WANG Botao, et al. Effects of pore-throat structures on the fluid mobility in Chang 7 tight sandstone reservoirs of Longdong area, Ordos Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 135:105407.
- [18] 黄兴, 李天太, 王香增, 等. 致密砂岩储层可动流体分布特征及影响因素——以鄂尔多斯盆地姬塬油田延长组长 8 油层组为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(5):557-567.  
HUANG Xing, LI Tiantai, WANG Xiangzeng, et al. Distribution characteristics and its influence factors of movable fluid in tight sandstone reservoir; a case study from Chang-8 oil layer of Yan-chang Formation in Jiyuan oilfield, Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(5):557-567.
- [19] 李磊, 鲍志东, 李忠诚, 等. 致密砂岩气储层微观孔隙结构与分形特征——以松辽盆地长岭气田登娄库组为例[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(6):1039-1052.  
LI Lei, BAO Zhidong, LI Zhongcheng, et al. Microscopic pore structure and fractal characteristics of tight sandstone gas reservoir; a case study of Denglouku Formation in Changling gas field, Songliao Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(6):1039-1052.
- [20] 李咪, 郭英海, 杨亦浩, 等. 黏土矿物和孔喉特征对致密砂岩可动流体分布的影响——以鄂尔多斯盆地东部山西组储层为例[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(9):1627-1640.  
LI Mi, GUO Yinghai, YANG Yihao, et al. Effects of clay minerals and pore-throat characteristics on the movable fluid of tight sandstones; a case study of the Shanxi Formation in eastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(9):1627-1640.
- [21] DONG Xinxu, MENG Xiangzhen, PU Renhai. Impacts of mineralogy and pore throat structure on the movable fluid of tight sandstone gas reservoirs in coal measure strata; a case study of the Shanxi Formation along the southeastern margin of the Ordos Basin[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2023, 220:111257.
- [22] JIANG Ziran, RAN Bo, LI Zhiwu, et al. A Late Triassic depositional age for the Xujiache Formation, Sichuan Basin; implications for the closure of the Paleo-Tethys ocean[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 155:106346.
- [23] ZHENG Jianchao, LIN Liangbiao, YU Yu, et al. Chronology and geofluids characteristics of calcite cement in the Upper Triassic Xujiache Formation tight sandstone reservoir, western Sichuan Basin, SW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 170:107148.
- [24] 施振生, 朱筱敏, 张亚雄, 等. 四川盆地上三叠统沉积储层研究进展与热点分析[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(4):784-800.  
SHI Zhensheng, ZHU Xiaomin, ZHANG Yaxiong, et al. Advances and trending topics in sedimentary reservoir research of the Upper Triassic Xujiache Formation, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(4):784-800.
- [25] SAIDIAN M, PRASAD M. Effect of mineralogy on nuclear magnetic resonance surface relaxivity; a case study of Middle Bakken and Three Forks formations[J]. *Fuel*, 2015, 161:197-206.
- [26] ZHANG Chenxi, JIANG Fujie, HU Tao, et al. Oil occurrence state and quantity in alkaline lacustrine shale using a high-frequency NMR technique[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 154:106302.
- [27] 国家能源局. 岩样核磁共振参数实验室测量规范: SY/T6490—2023[S]. 北京: 石油工业出版社, 2023.  
National Energy Administration. Specification for laboratory measurement of NMR parameters of rock samples; SY/T 6490-2023[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023.
- [28] ZHU Feng, HU Wenxuan, CAO Jian, et al. Micro/nanoscale pore structure and fractal characteristics of tight gas sandstone; a case study from the Yuanba area, northeast Sichuan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology* 2018, 98:116-32.
- [29] 肖佃师, 卢双舫, 姜微微, 等. 基于粒间孔贡献量的致密砂岩储层分类——以徐家围子断陷为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(10):1123-1134.  
XIAO Dianshi, LU Shuangfang, JIANG Weiwei, et al. Classification of tight sandstone reservoirs based on the contribution of intergranular pores; a case study of Xujiaweizi fault depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(10):1123-1134.
- [30] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. *石油学报*, 2011, 27(6):1857-1864.  
ZOU Caineng, ZHU Rukai, BAI Bin, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6):1857-1864.
- [31] 刘桃, 刘景东, 李建青, 等. 鄂尔多斯盆地新安边地区长 7 致密储层连通孔隙评价[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(3):1111-1122.  
LIU Tao, LIU Jingdong, LI Jianqing, et al. Evaluation of connected porosity of Chang 7 tight reservoir in Xin'anbian area, Ordos Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(3):1111-1122.
- [32] LIU Hongping, ZHAO Yanchao, LUO Yang, et al. Diagenetic facies controls on pore structure and rock electrical parameters in tight gas sandstone[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2015, 12(4):587-600.

- [33] 鲍磊,侯加根,刘钰铭,等.致密砂岩储层多尺寸孔喉结构对可动流体分布的影响——以鄂尔多斯盆地北部锦 58 井区下石盒子组为例[J].石油科学通报,2025,10(2):342-360.  
BAO Lei,HOU Jiagen,LIU Yuming,et al.The impact of multi-scale pore-throat structures on movable fluid distribution in tight sandstone reservoirs:a case study of the Lower Shihezi Formation in the J58 well area,Northern Ordos Basin[J].Petroleum Science Bulletin,2025,10(2):342-360.
- [34] 卢振东,刘成林,臧起彪,等.高压压汞与核磁共振技术在致密储层孔隙结构分析中的应用:以鄂尔多斯盆地合水地区为例[J].地质科技通报,2022,41(3):300-310.  
LU Zhendong,LIU Chenglin,ZANG Qibiao,et al.Application of high pressure mercury injection and nuclear magnetic resonance in analysis of the pore structure of dense sandstone;a case study of the Heshui area,Ordos Basin[J].Bulletin of Geological Science and Technology,2022,41(3):300-310.
- [35] 吴云飞,刘成林,冯小龙,等.致密砂岩储层微观结构特征及分类评价——以鄂尔多斯盆地南梁油田长 9 储层为例[J].断块油气田,2023,30(2):246-253.  
WU Yunfei,LIU Chenglin,FENG Xiaolong,et al.Microstructural characteristics and classification evaluation of tight sandstone reservoirs;a case study of the Chang 9 reservoir in the Nanliang oilfield of the Ordos Basin[J].Fault-Block Oil & Gas Field,2023,30(2):246-253.
- [36] 董鑫旭,孟祥振,蒲仁海.基于致密砂岩储层孔喉系统分形理论划分的可动流体赋存特征认识[J].天然气工业,2023,43(3):78-90.  
DONG Xinxu,MENG Xiangzhen,PU Renhai.Occurrence characteristics of movable fluids based on the division of pore throat system in tight gas reservoir by fractal theory[J].Natural Gas Industry,2023,43(3):78-90.
- [37] LI Pan,SUN Wei,WU Bolin,et al.Occurrence characteristics and influential factors of movable fluids in pores with different structures of Chang 63 reservoir,Huaqing oilfield,Ordos Basin,China[J].Marine and Petroleum Geology,2018,97:480-492.
- [38] HUO Hongliang,LIU Chenglin,ZHAO Aibin,et al.Evaluation of movable fluid and controlling factors in lacustrine gravity-flow tight sandstone reservoirs: implications for predicting reservoir quality[J].Journal of Asian Earth Sciences,2025,277:106374.
- [39] WU Yuping,LIU Cheng,OUYANG Siqi,et al.Investigation of pore-throat structure and fractal characteristics of tight sandstones using HPMI,CRMI,and NMR methods;a case study of the lower Shihezi Formation in the Sulige area,Ordos Basin[J].Journal of Petroleum Science and Engineering,2022,210:110053.
- [40] SUN E W H,BOURG I C.Molecular dynamics simulations of mineral surface wettability by water versus CO<sub>2</sub>: thin films, contact angles, and capillary pressure in a silica nanopore[J].The Journal of Physical Chemistry C,2020,124(46):25382-25395.
- [41] ZHANG Yimin,LIN Chengyan,WU Yuqi,et al.Effects of wettability and minerals on residual oil distributions based on digital rock and machine learning[J].Lithosphere,2022,2022(Special 12):1029304.
- [42] HUANG Yunsheng,SHEN Lei,LIU Hui.Grey relational analysis,principal component analysis and forecasting of carbon emissions based on long short-term memory in China[J].Journal of Cleaner Production,2019,209:415-423.

(收稿日期 2025-08-13 改回日期 2026-02-24 编辑 雷永良)