

基于矿物组分微观润湿特性的页岩油可动性研究

贾鈞¹, 邓森^{2,3}, 鲜成钢¹, 左玄¹, 杨景辉¹, 高之业¹,

钟世博¹, 张党政¹, 吴楠¹

(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. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 大庆, 163412;

3. 黑龙江省油层物理与渗流力学重点实验室, 大庆, 163412)

摘要: 页岩油作为重要的非常规能源, 其高效开发对保障能源安全具有重要意义。页岩储层呈现低孔低渗、孔隙结构复杂且矿物组成多样的特点, 导致润湿性特征极为复杂, 而润湿性作为控制油相赋存和流动的关键参数, 直接影响页岩油的开发效果。传统润湿性研究主要依赖宏观接触角测量, 难以准确揭示纳米级孔隙中的润湿行为及其对油相可动性的控制机理。本研究旨在建立页岩储层多尺度润湿性表征方法, 并揭示润湿性特征、孔隙结构与油相可动性之间的内在联系。基于古龙页岩样品, 采用宏微观接触角测量表征多尺度润湿性特征, 利用核磁共振技术独立评价不同尺度孔隙中的油相可动性, 通过系统的关联分析探索润湿性对可动性的控制机制。研究发现, 微观接触角虽系统性大于宏观值, 但两种方法测量趋势高度一致, 验证了跨尺度表征的可靠性。与以往单一尺度认知不同, 揭示了孔隙结构与可动性需要协同评价: 最优储层可能并非大孔占比最高者, 而是孔隙结构均衡(大孔占比 60%~80%)且各级孔隙可动性均较高的储层; 同时发现矿物组分对多尺度孔隙系统采收率具有差异化控制作用, 石英含量与大、小孔隙采收率均呈显著正相关, 而不同类型黏土矿物表现出尺度依赖的复杂影响。通过关联分析, 建立了润湿性与可动性的定性关系以及矿物组分与可动性的定量评价模型。该研究为页岩油储层甜点识别提供了新的评价方法, 强调需要综合考虑孔隙结构、润湿性和可动性的协同效应。

关键词: 页岩油 微观润湿 可动性评价 采收率

中图分类号: P618; TE34

收稿日期: 2025-07-04

Shale Oil Mobility Based on Microscopic Wetting Properties of Mineral Components

JIA Bao¹, DENG Sen^{2,3}, XIAN Chenggang¹, ZUO Xuan¹, YANG Jinghui¹, GAO Zhiye¹, ZHONG Shibo¹,
ZHANG Dangzheng¹, WU Nan¹

(1.State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

基金项目: 黑龙江省揭榜挂帅科技攻关项目“古龙页岩油提高采收率关键问题研究”(DQYT-2022-JS-761)、国家自然科学基金面上基金(No. 5247040153)资助。

作者简介: 贾鈞(1990—), 男, 副研究员, 博士生导师, 主要从事油气田开发相关研究。

ORCID: 0000-0003-1953-0696. E-mail: baojia90@cup.edu.cn

2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Daqing Oilfield of CNPC, Daqing 163412, China;
3. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Reservoir Physics and Percolation Mechanics, Daqing 163412, China)

Abstract: As an important unconventional energy resource, the efficient development of shale oil is of great significance for ensuring energy security. Shale reservoirs exhibit characteristics of low porosity and permeability, complex pore structures, and diverse mineral compositions, resulting in extremely complex wettability characteristics. Wettability, as a key parameter controlling oil phase occurrence and flow, directly affects shale oil development efficiency. Traditional wettability studies mainly rely on macroscopic contact angle measurements, which struggle to accurately reveal wetting behavior in nanoscale pores and its control mechanisms on oil phase mobility. This study aims to establish a multi-scale wettability characterization method for shale reservoirs and reveal the intrinsic relationships among wettability characteristics, pore structure, and oil phase mobility. Based on Gulong shale samples, macro- and microscopic contact angle measurements were employed to characterize multi-scale wettability features, nuclear magnetic resonance technology was used to independently evaluate oil phase mobility in different-scale pores, and systematic correlation analysis was conducted to explore the control mechanisms of wettability on mobility. The study found that although microscopic contact angles are systematically larger than macroscopic values, the measurement trends from both methods are highly consistent, validating the reliability of cross-scale characterization. Different from previous single-scale understanding, this study reveals that pore structure and mobility require synergistic evaluation: optimal reservoirs may not be those with the highest proportion of large pores, but rather those with balanced pore structure (60%-80% large pore proportion) and high mobility in all pore sizes; additionally, mineral components exhibit differentiated control effects on multi-scale pore system recovery rates, with quartz content showing significant positive correlation with both large and small pore recovery rates, while different clay minerals demonstrate scale-dependent complex influences. Through correlation analysis, qualitative relationships between wettability and mobility, as well as quantitative evaluation models between mineral components and mobility, were established. This research provides new evaluation methods for shale oil reservoir sweet spot identification, emphasizing the need to comprehensively consider the synergistic effects of pore structure, wettability, and mobility.

Key Words: shale oil; microscopic wetting; mobility evaluation; recovery factor

1 引言

我国陆相页岩油资源丰富,松辽盆地古龙页岩是重要的勘探开发目标(邹才能等, 2023; 孙龙德等, 2024; 万晓帆等, 2023)。页岩储层呈现低孔低渗、孔隙结构复杂且具有明显多级特征,同时矿物组成复杂多样,包括石英、长石以及多种黏土矿物类型,这些特点导致了页岩储层的复杂润湿特征(袁士义等, 2023; 孙龙德等, 2021)。

润湿性作为关键的岩石物理参数,既影响原油赋存状态,又控制流体流动形态,是制约页岩油开发的重要因素之一(周波等, 2004; 周小航等, 2022; 霍旭等, 2023)。不同矿物组分具有不同的表面化学性质和润湿特性:石英表面富含羟基,表现出强亲水性;黏土矿物中,蒙脱石、绿泥石等表现出强亲水性,相比而言,伊利石相对亲油。此外,这些矿物的润湿特征在页岩多尺度孔隙中不尽相同,对油相的赋存和流动产生不同影响(余曹等, 2024; 项林语等, 2022; 王忠楠等, 2021)。

传统的润湿性研究主要依赖宏观接触角测量,难以揭示纳米孔隙中的润湿行为(AlOmier et al., 2024; Yang et al., 2024)。本研究创新性地采用多尺度研究方法:通过宏观

接触角测量系统表征不同尺度下的润湿性特征，利用核磁共振技术独立评价油相在不同尺度孔隙中的可动性，进而通过关联分析探索润湿性参数与可动性指标之间的内在联系。同时，本研究特别关注孔隙结构分布与可动性的协同效应，旨在建立综合考虑润湿性、孔隙结构和可动性的页岩油多尺度评价体系，为页岩油储层甜点识别和开发策略优化提供理论依据。

2 地质背景与样品特征

2.1 研究区概况

古龙页岩具有有机质丰度高、成熟度高、黏土矿物含量丰富、页理发育密度大等特点。孔隙类型以溶孔、黏土矿物晶间孔和有机质孔缝为主，含油饱和度较高，产出轻质油且气油比偏高，具备良好的页岩油富集条件和开发潜力（孙龙德等，2024；袁士义等，2023；何文渊等，2023；蔚远江等，2023）。

2.2 样品基本特征

本研究选取古龙区块 4 块代表性岩心样品。通过 X 射线衍射分析获得样品矿物组成特征（表 1）。研究区页岩样品主要以石英（26.8%~39.8%）、斜长石和黏土矿物（33.0%~46.5%）为主。黏土矿物中伊利石含量最高（28%~79%），其次为伊蒙混层。值得注意的是，根据前期研究，古龙页岩在中-高成熟度条件下（ $R_o > 0.75\%$ ）成岩演化过程中蒙脱石已达到消亡线并转化为伊利石等其他黏土矿物，因此不含蒙脱石，推测伊蒙混层中的“蒙”为皂石成分（孙龙德等，2024）。

表 1 页岩样品矿物组成特征汇总

Table 1 Summary of mineral composition characteristics of shale samples

编号	全岩矿物含量/%							黏土矿物相对含量/%			
	石英	钾长石	斜长石	方解石	黄铁矿	铁白云石	黏土矿物	伊蒙混层	伊利石	绿泥石	混层比/%S
ZY1	36.1	13.1	9.4	8.4	0	0	33	38	28	34	10
GY2	29	1.2	18.5	0	4.8	0	46.5	33	62	5	10
GY3	39.8	1.1	12	1.8	4.2	0	41.1	17	79	4	10
GY4	26.8	0.8	19.1	6.8	2	5.5	39	24	50	26	5

3 实验方法与技术

3.1 微观结构表征

采用 ZEISS Merlin 扫描电镜对页岩样品进行微观结构表征。样品制备步骤：将岩心样品切割成 5mm×5mm×2mm 的小块，经氩离子抛光后，喷金处理。扫描参数设置：加速电压 15kV，工作距离 8~10mm，放大倍数 500~50000 倍，对孔隙类型、矿物组成和分布特征进行系统观察和分析。

3.2 润湿性表征方法

3.2.1 宏观接触角测量

采用 KRUSS DSA100 接触角测量仪，使用座滴法测量气-水接触角、捕泡法测量油-水

接触角。座滴法是将一定体积的液滴置于固体表面，通过分析液滴轮廓测量三相接触线处的接触角，具有操作简便、所需样品量小的优点，但易受表面粗糙度影响，且在测量过程中样品测试空间需要保持温度湿度恒定（Drelich et al., 1996; Ponomar et al., 2022）。捕泡法是将样品浸没在液体中，通过注射器在样品表面形成气泡或不混溶液滴来测量接触角，该方法无需考虑测试空间湿度，但操作相对复杂，气泡定位耗时较长（Hashemi et al., 2021; Sarkar et al., 2021）。

样品预处理：表面经 3000 目砂纸打磨，60℃烘干 24 小时，测试温度 $28\pm0.5^{\circ}\text{C}$ 。每个样品测量 5 个不同位置，液滴静置 5 分钟待其稳定后，测量接触角并取平均值，液体分别使用去离子水和古龙页岩油原油（图 1）。

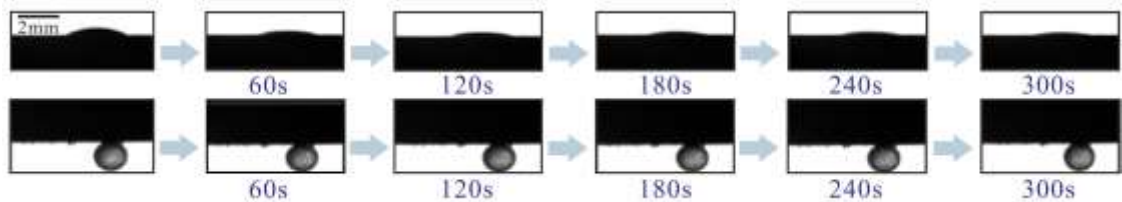


图 1 气-水（上）和油-水（下）接触角测量

Figure 1 Contact angle measurements of air-water (top) and oil-water (bottom) systems

3.2.2 微观接触角评价

采用环境扫描电镜（ESEM, Quanta 650FEG, FEI）进行微观润湿性表征。实验温度控制在 $-0.5\sim0.5^{\circ}\text{C}$ 范围内，环境压力从 300 Pa 逐步调节至 700 Pa。实验样品采用切片制备并经氩离子抛光处理以获得光滑表面。通过 Peltier 冷台精确控制样品温度，同时调节腔室环境压力，使水蒸气在样品表面凝结形成直径约 $10\ \mu\text{m}$ 至 $100\ \mu\text{m}$ 的微米级液滴。实验过程中实时观察并记录液滴在样品表面的形态变化，采用图像分析软件对获得的显微图像进行处理，计算接触角数值。

3.3 核磁共振技术

采用纽迈核磁共振分析仪（MicroMR12-150H-I）测试饱和油样品的 T_2 弛豫时间谱。测试参数为：共振频率 12.798 MHz，磁体温度 $35.00\pm0.02^{\circ}\text{C}$ ，回波时间 0.07 ms，回波个数 6000，扫描次数 32。通过分析 T_2 谱的分布特征，识别不同尺度孔隙中的油相赋存状态。本研究选取古龙区块 4 块代表性岩心样品。样品基本物性参数如表 2 所示。

表 2 页岩样品基础物性参数

Table 2 Basic physical properties of shale samples				
样品编号	直径/cm	长度/cm	孔隙度/%	渗透率/md
ZY1	2.55	4.28	6.11	0.49
GY2	2.58	4.18	6.66	0.47
GY3	2.61	4.25	9.72	2.04
GY4	2.58	4.19	9.6	0.064

3.4 可动性评价方法

本研究采用高速离心机对页岩油可动性进行评价。离心参数设置为转速分别为 400、800、1200、2000、2400 和 4000 r/min，每级离心时间为 30 分钟，实验温度控制在 25°C 。

实验按以下步骤进行。首先，测量样品饱和油前后的初始质量并记录其核磁共振信号。然后，按照预设的转速参数对样品进行逐级离心处理。在每级离心完成后，测量样品质量并

采集核磁共振信号数据，根据测量结果计算各级离心条件下的采收率。

4 结果与讨论

4.1 页岩储层微观结构特征

4.1.1 孔隙发育特征

储层内微纳米孔隙是页岩油的主要储集空间，根据孔隙的成因机制、赋存位置和形态特征，可将其划分为粒间孔、粒内孔、微裂缝及有机质孔隙四类 (Loucks et al., 2012)。通过 ZEISS Merlin 扫描电镜结合能谱分析观察发现，不同类型孔隙的发育特征与矿物组成的空间分布相关。

粒间孔由石英等碎屑颗粒之间的原始孔隙空间构成，主要形成于沉积过程中 (图 2a)，此外还包括成岩过程中不稳定矿物被酸性流体溶蚀后形成的次生溶蚀孔隙 (图 2b)。观察发现，原生粒间孔在成岩过程中受到强烈改造，孔隙空间显著缩减，残余粒间孔尺寸较小，形态不规则，且多数被成岩矿物不同程度充填。次生溶蚀孔隙主要由长石和碳酸盐矿物在有机酸作用下发生选择性溶蚀形成，呈港湾状、蜂窝状，孔径主要分布在 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 之间，孔隙边缘发生轻微溶蚀，但部分溶蚀空间被后期析出的自生矿物占据，导致有效孔隙空间进一步降低。

有机质孔隙是页岩储层的重要储集空间，有机质呈黑灰色条带状分布于基质中 (图 2c)。有机质内部孔隙发育良好，呈斑点状、气泡状或蜂窝状结构。这类孔隙的发育程度与有机质热演化程度密切相关，孔隙壁面相对光滑，几何形态复杂多样。

微裂缝系统在样品中发育程度有限，裂缝较为狭长，观察到的裂缝宽度约 $2\mu\text{m}$ (图 2d)。微裂缝主要发育于较大矿物颗粒周围或颗粒接触部位，部分由机械压实导致的石英颗粒破碎形成。虽然微裂缝在一定程度上连接了孤立的孔隙，但整体连通性仍然有限。

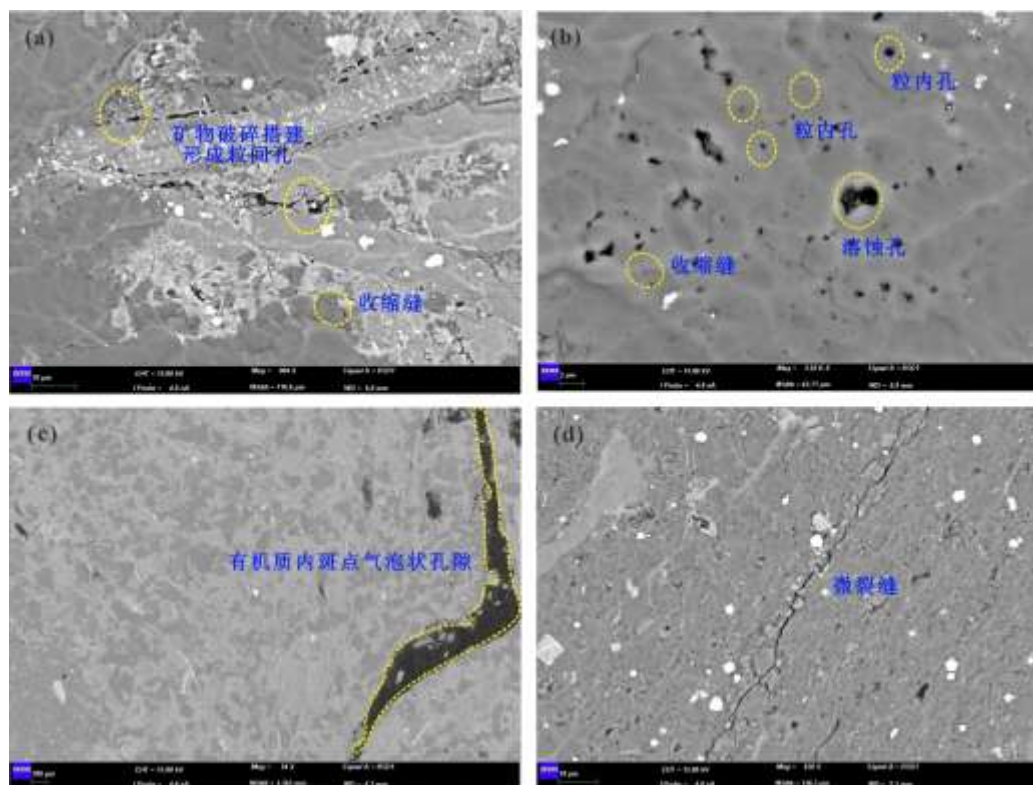


图 2 样品孔隙发育特征

Figure 2 Pore development characteristics in the studied shale

4.1.2 矿物分布特征

基于扫描电镜观察结合 X 射线衍射分析数据,研究区页岩储层矿物组成复杂,不同矿物组分在各类孔隙系统中呈现差异化分布特征,影响储层的孔隙结构和流体流动能力。

在粒间孔隙系统中,伊利石是最主要的充填矿物,以薄片状、丝缕状形态沿孔隙壁分布或呈絮状充填于孔隙空间(图 2a)。根据 XRD 分析,伊利石在黏土矿物中的相对含量为 28%~79%(表 1)。石英颗粒作为骨架矿物构成粒间孔隙的边界,部分区域可见方解石胶结物分布于颗粒接触部位,进一步减小了有效孔隙空间。

溶蚀孔隙中的矿物分布更为复杂,自生石英是最典型的充填矿物,主要通过晶面生长方式析出于长石溶蚀孔内(图 2b)。伊蒙混层矿物以层状结构充填于溶蚀孔隙中,其相对含量为 17%~38%,膨胀性特征使其对孔隙稳定性产生重要影响。绿泥石相对含量为 4%~34%,多呈玫瑰花状集合体分布在溶蚀孔隙边缘。

有机质孔隙系统中的矿物组合相对简单,主要为有机质本身构成孔隙壁面(图 2c)。黄铁矿在 GY2、GY3、GY4 三个样品中广泛分布于有机质附近,呈典型的草莓状、立方体状集合体,含量分别为 4.8%、4.2%和 2.0%,ZY1 样品中未检出黄铁矿(表 2)。黄铁矿的分布反映了有机质富集区域的局部还原性成岩环境特征。

微裂缝系统中的矿物充填现象普遍,伊利石是最主要的充填矿物,以定向排列的薄片状结构充填裂缝空间(图 2d)。部分微裂缝中还可见有机质和方解石的混合充填。矿物颗粒间的强烈压实导致石英颗粒破碎形成的新生裂隙,往往被黏土矿物快速充填,使得裂缝的连通作用受到显著限制。

4.2 润湿性特征分析

4.2.1 宏观润湿性表征

水接触角测量结果显示,ZY1 样品的接触角为 35.45°,GY2 为 52.52°,GY3 为 10.23°,GY4 为 15.13°。根据润湿性判别标准(施砍园等,2024; Arif et al.,2021),所有样品均为亲水性,其中 GY3 样品表现出最强的亲水性。油水接触角测量显示,接触角均大于 105°,ZY1 样品的油水接触角为 145.33°,GY2 为 142.69°,GY3 为 122.3°,GY4 为 144.64°。值得注意的是,GY3 样品在气-水、油-水体系中均呈现最小接触角。

为确保测量结果的准确性,所有样品在测试前均经过相同程度的抛光处理,并彻底清理表面杂质,将岩石本体完全暴露。表面清洁的重要性在于,若表面存在油渍等污染物,测得的润湿角实际反映的是油膜与水或油滴的接触角,而非矿物表面的真实润湿性。宏观润湿角测试中,每个液滴大小保持基本一致,通过相同注射器控制滴液过程,油滴普遍比水滴略小。

对四个样品的水接触角与矿物含量进行相关性分析,结果显示,石英含量与水接触角呈负相关,表明石英含量增加会降低接触角,增强亲水性,GY3 样品石英含量最高(39.8%)而水接触角最小(10.23°)。相比之下,黏土矿物总量与水接触角呈微弱正相关,GY2 样品黏土含量最高(46.5%)对应较大的接触角(52.52°)。

4.2.2 微观润湿性评价

微观接触角测试在环境扫描电镜(ESEM, Quanta 650FEG, FEI)低温低压环境下进行。实验过程中将样品温度维持在-0.5~0.5℃的窄温度区间内,腔室压力在 300~700 Pa 范围内精确调控。利用 Peltier 制冷系统的温度梯度效应,结合腔室内水蒸气分压的动态调节,在页岩表面诱导生成 10~100 μm 粒径范围的球形微液滴,实现对单个矿物颗粒表面润湿行为的原位观测。

ESEM 测量结果显示,微观接触角系统性大于宏观接触角 5%到 25%(图 3)。这种现象的产生机制可以从多个物理层面进行解释。根据 Donald(2003)的研究,ESEM 环境下的低真

空条件（300~700 Pa）和接近冰点的温度控制对液滴的润湿行为产生显著影响（Donald et al., 2003）。在这种特殊环境中，水的表面张力随温度降低而增大（Kou et al., 2019; Oosterlaken et al., 2022），根据 Young 方程的热力学关系，表面张力的增大通常会导致接触角的相应增大，从而使润湿性表现出相对降低的趋势（王翔宇等，2024；魏永峭等，2025）。

Klauser 等通过液态金属 Galinstan 的纳米尺度接触角研究进一步证实了这种尺度效应的存在。他们在 SEM 真空环境下，利用机器人纳米操作系统直接测量了不同尺寸液态金属液滴的前进角和后退角。实验结果表明，当液滴直径从宏观尺度减小到微米及亚微米尺度时，接触角表现出显著的尺寸依赖性，随着液滴尺寸的减小，后退角和平衡接触角呈现下降趋势，而前进角相对稳定。通过修正 Young 方程的拟合分析，他们确定了 Galinstan 在不锈钢表面的表观线张力值为 4.02×10^{-7} J/m。需要指出，这些结果证明了微观接触角测量与传统宏观测量之间存在的系统性差异，但是无法直接推广到其他液体系统。

相似的，Jasper 和 Rasipuram (2017)的研究发现传统的连续体模型预测接触角余弦值与接触线半径倒数之间存在线性关系，但实验证据表明非挥发性纳米液滴实际呈现非线性关系。这种非线性关系的关键在于当液滴尺寸减小到飞升到阿升级别时，曲线出现平缓化现象，这可以通过加入内部 Laplace 压力项来解释。他们通过对三种不同液体（壬烷、十二烷和甘油三油酸酯）的实验，发现超小液滴的接触角实际上小于宏观液滴的接触角，这一现象无法用传统的 Young 方程完全解释。

同时，从另一个方面讲，除了低温下表面张力的增大，表面微观形貌在微米尺度测量中的影响也较为重要。相比于宏观液滴能够“平均化”表面粗糙度的影响，微米级液滴更容易受到局部表面不均匀性的控制，导致接触角出现增大趋势，这一现象符合 Cassie-Baxter 模型的预测：当液滴无法完全浸润粗糙表面的凹陷部分时，会悬浮在表面突起上形成液-固-气三相复合界面，使得表观接触角显著增大并表现出增强的疏水特性（Cassie et al., 1994; Zhang et al., 2014; Rao et al., 2021）。值得强调的是，这种系统性差异反映的是真实的物理现象，而非实验误差。微观和宏观测量结果呈现的高度一致变化趋势（相关系数 $R^2=0.84$ ）验证了多尺度润湿性表征方法的科学性和互补性。

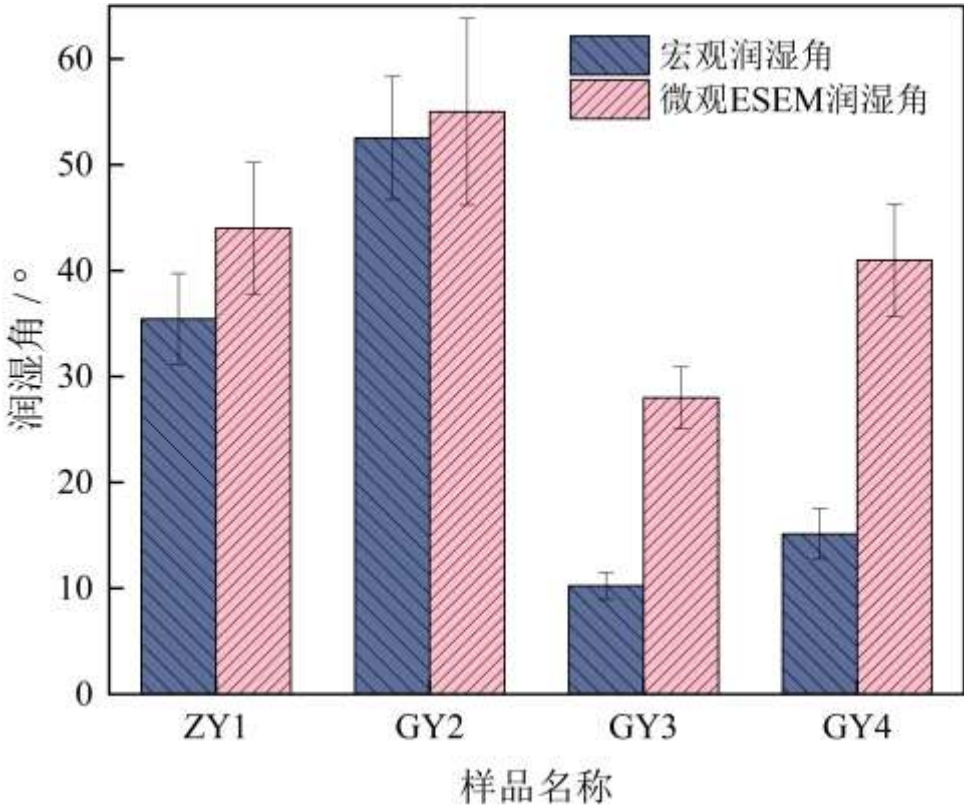


图 3 四个样品宏观与微观接触角测量结果对比（两种方法相关系数 $R^2=0.84$ ）

Figure 3 Comparison of macroscopic and microscopic contact angle measurements for four samples (correlation coefficient $R^2=0.84$ between the two methods)

根据 AlRatrout 等的研究,即使在矿物组成相对均匀的岩石中也观察到接触角的宽分布,粗糙表面与较低接触角和较高界面曲率密切相关 (AlRatrout et al., 2018)。为系统研究表面形貌对润湿性的影响规律,本研究基于 Wenzel 理论和 Cassie-Baxter 理论设计了梯度粗糙度对比实验 (倪家伟等, 2024; Tzitzilis et al., 2024)。为了系统涵盖这些不同粗糙度参数对润湿性的影响,采用四种不同程度的表面处理方法制备差异化粗糙度表面: (1) 氩离子抛光处理, 获得最光滑表面; (2) 3000 目砂纸打磨; (3) 1200 目砂纸打磨; (4) 300 目砂纸打磨。抛光程度越轻,越能保留材料的原始孔隙特征和微观结构。通过原子力显微镜(AFM)精确测量各表面的粗糙度参数, AFM 能够实现纳米级测量精度, 相比 X 射线微 CT 的具有分辨率优势 (杨涛, 2022)。

测量结果显示四种表面的算术平均粗糙度 R_a 分别为 25.1、75.7、190.7、239.3 nm, 均方根粗糙度 R_q 分别为 33.4、97.2、248.7、312.7 nm (图 4)。实验结果表明,随着表面粗糙度的系统性增加,观察到液滴形态从凝聚态向铺展态的明显转变,说明粗糙度增加能够增强固液界面的亲和力。这一现象符合 Wenzel 理论的预测: 当表面本征接触角小于 90° 时,粗糙度的增加会使表观接触角进一步减小,表面表现出更强的亲水性;粗糙度通过增大真实接触面积而放大材料的固有润湿特性。同时,在某些情况下,表面可能存在 Cassie-Baxter 润湿态和 Wenzel 润湿态之间的转变,这种转变受表面几何结构、材料表面能以及外部条件的共同影响,这一现象在本研究中没有观察到。

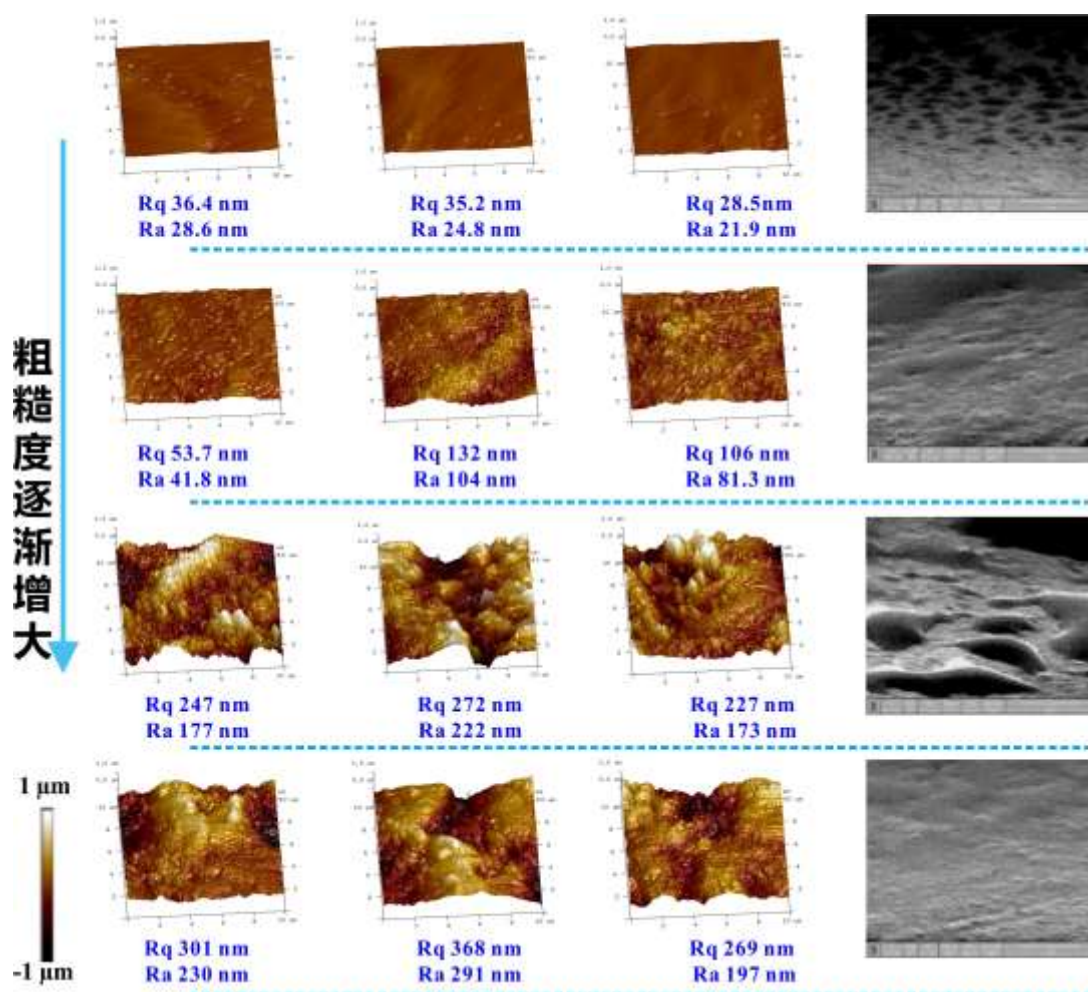


图 4 表面粗糙度对微观润湿形态的影响（从上到下为粗糙度不断增加的四个样品，以蓝色点状直线为分割）

Figure 4 Effect of surface roughness on microscopic wetting morphology (from top to bottom showing four samples with increasing surface roughness, separated by blue dotted lines)

4.3 页岩油多尺度可动性评价

为了定量评价页岩油在不同尺度孔隙中的可动性特征，本研究基于多转速离心-核磁共振联合技术，通过分析不同矿物组分含量与各级孔隙中油相可动性的相关关系，建立了页岩油多尺度可动性定量评价模型。

4.3.1 核磁共振 T_2 谱特征

核磁共振 T_2 弛豫谱分析显示，所有样品呈现双峰或多峰分布特征。低 T_2 部分对应小孔隙系统，主要包括黏土矿物孔隙和部分有机质孔隙。高 T_2 部分对应大孔隙系统，主要包括粒间孔、溶蚀孔和微裂缝。

饱和油前后 T_2 谱的变化反映了不同孔隙系统的油相充注特征。大孔隙系统的 T_2 峰值在饱和油后明显增大，表明油相优先充注大孔隙。ZY1 和 GY3 小孔隙系统的 T_2 峰值变化相对较小，表明小孔隙中的油相充注程度相对较低（图 5）。

值得注意的是， T_2 截止值的确定对大小孔隙划分具有重要影响。通过分析发现，ZY1、GY2 和 GY3 三个样品的 T_2 谱在 1ms 附近呈现相似的双峰分界特征，因此采用约 1ms 作为大小孔隙的分界值。GY4 样品由于其超低渗透率（0.064md）导致孔隙结构特征显著不同，

其 T_2 谱形态更为复杂，软件自动识别的截止值为约 20ms。考虑到 GY4 样品的特殊性可能对统计分析结果产生干扰，在建立矿物组分与可动性定量关系模型时，主要基于具有相似孔隙结构特征的前三个样品进行分析。

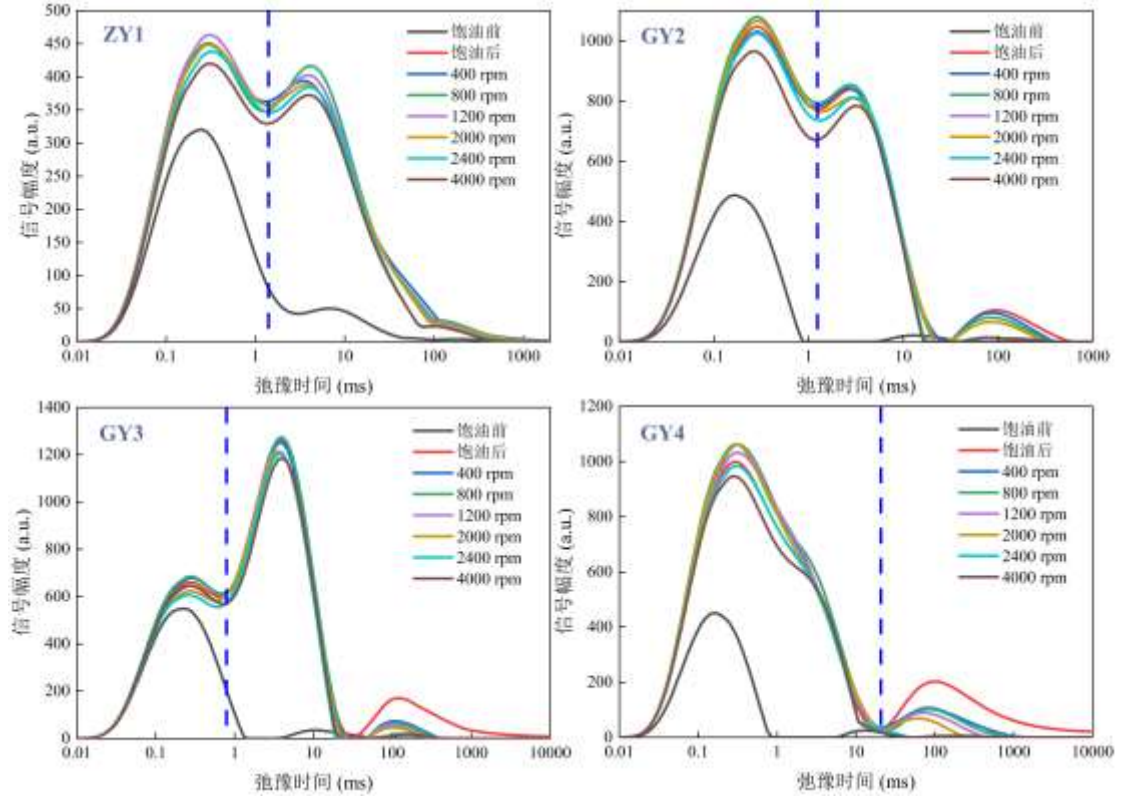


图 5 样品饱和油前后与不同离心转速处理的核磁共振 T_2 图谱对比

Figure 5 NMR T_2 spectra comparison of samples before/after oil saturation and at various centrifugal speeds

4.3.2 离心实验结果分析

阶梯离心实验结果表明，随着离心转速的递增，不同尺度孔隙中的油相采出行为呈现显著差异（图 6）。本研究基于核磁共振 T_2 谱信号变化，分别计算大孔隙系统和小孔隙系统的采收率。

大孔采收率计算公式：

$$R_{LP} = \frac{S_{LP,sat} - S_{LP,cent}}{S_{LP,sat} - S_{LP,dry}} \times 100\%$$

小孔采收率计算公式：

$$R_{SP} = \frac{S_{SP,sat} - S_{SP,cent}}{S_{SP,sat} - S_{SP,dry}} \times 100\%$$

其中， R_{LP} 和 R_{SP} 分别为大孔和小孔采收率； $S_{LP,sat}$ 和 $S_{SP,sat}$ 为饱和油后大孔和小孔的 NMR 信号强度； $S_{LP,cent}$ 和 $S_{SP,cent}$ 为某转速离心后大孔和小孔的信号强度； $S_{LP,dry}$ 和 $S_{SP,dry}$ 为饱和油前大孔和小孔的初始信号强度。

值得注意的是，部分样品在特定转速条件下出现负采收率现象（图 6a），特别是 GY2 样品在 400~800 r/min 低速离心时，大孔采收率为负数，负采收率表明该孔隙系统中的含油量不但没有减少，反而有所增加，这一反常现象揭示了页岩多尺度孔隙系统间存在复杂的流体交换机制。由于大孔隙和小孔隙的毛管压力差异，离心作用下小孔隙中部分相对松散束缚的

油相可能向毛管阻力较小的大孔隙系统迁移。GY2 样品表现最为明显，这与其最高的黏土矿物含量（46.5%）密切相关——黏土矿物构成的小孔隙系统在离心力作用下更容易发生油相释放，同时其形成的复杂孔隙网络为流体的跨尺度迁移提供了通道。随着离心转速增加到 1200 r/min 以上，离心驱动力逐渐增强，能够克服出口端的阻力将油相驱出样品，所有样品的大孔采收率均转为正值。

图 6a 显示，大孔隙系统在全转速范围内（400~4000 r/min）均有类似响应。小孔隙系统的油相动用机制表现出更强的复杂性，使用全速范围内数据显示，各样品采收率变化趋势线的斜率呈现正负交替的无规律性。这种差异化响应表明在较低离心力条件下，小孔隙系统尚未形成稳定统一的油相动用模式，流体在多尺度孔隙间的交换作用占主导地位。小孔关键的转折点出现在 2000 r/min 之后：当转速超过 2000 r/min 时，所有样品的采收率变化趋势线斜率均转为正值，表现出一致的递增规律（图 6b）。在 2400 r/min 时，三个样品的小孔采收率分别为：ZY1（0.10%）、GY2（-1.28%）、GY3（9.81%）；到 4000 r/min 时进一步增加至：ZY1（1.07%）、GY2（2.44%）、GY3（11.72%）。这个发现说明，只有当离心力达到足够强度（>2000 r/min）后，才能有效克服小孔隙系统的高毛管阻力，建立起稳定的油相动用机制。

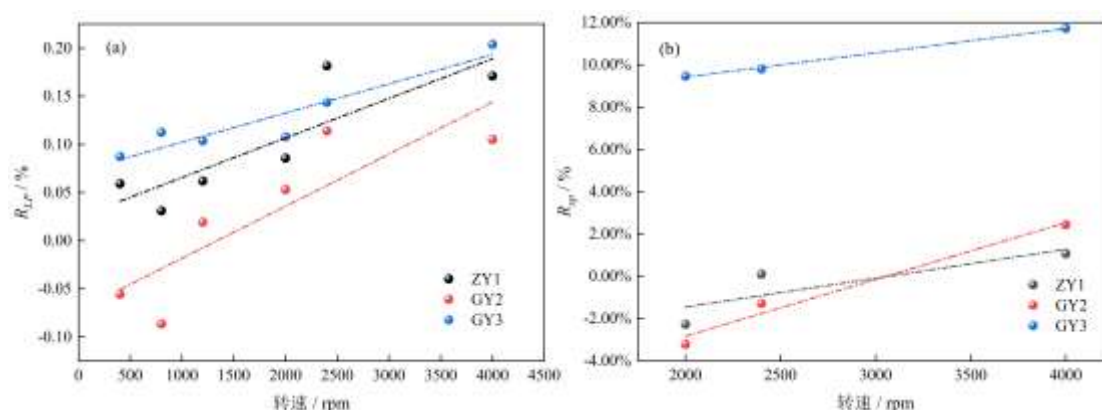


图 6 同离心转速下页岩油多尺度孔隙系统采收率变化曲线：(a) R_{LP} 随离心转速变化特征；(b) R_{SP} 变化特征

Figure 6 Recovery factor curves of multi-scale pore systems in shale oil at different centrifugal speeds: (a)

Recovery factor characteristics of large pore system with centrifugal speed; (b) Recovery factor characteristics of small pore system

4.3.3 可动性定量评价模型

为了定量评价页岩油在不同尺度孔隙中的可动性特征，本研究基于多转速离心-核磁共振联合技术，通过分析不同矿物组分含量与各级孔隙中油相可动性的相关关系，建立了页岩油多尺度可动性定量评价模型，步骤如下。

1) 相关性分析

采用线性回归分析方法，对每个离心转速下的可动性与矿物组分含量进行统计分析，计算相关性直线 $y=mx+b$ 的斜率 m 值。需要说明的是，本研究并非将 6 个转速下的 18 个数据点用于单一的多元线性拟合，而是分别对每个转速条件下 3 个样品的数据进行线性回归，得到该转速下矿物组分影响的斜率值。通过分析不同转速下斜率的正负性及其变化规律，判断矿物组分对采收率的贡献方向。相关性判定标准为：当从某个转速开始，采收率与矿物含量的相关性曲线保持一致的上升或下降趋势时，即可确定存在显著相关关系。将所有符合一致性条件的转速下斜率的平均值作为该矿物组分的影响系数 a 。这种方法能够验证矿物组分影响的稳定性和可靠性，避免了单一转速数据可能存在的偶然性误差。

2) 大孔隙可动性影响因素分析

基于 3 个样品在 6 个不同转速下的系统实验（共计 18 个数据点），建立大孔隙可动性定

量关系模型:

大孔可动性(LPM) = 0.9605 × X_{石英} - 0.4694 × X_{黏土总量}

其中, X_{石英}和 X_{黏土总量}分别为石英含量和黏土矿物总含量 (%)。

3) 小孔隙可动性影响因素分析

小孔隙可动性的影响因素更为复杂, 需要考虑不同类型黏土矿物的差异性影响。建立的定量关系模型为:

小孔可动性(SPM) = 0.8897 × X_{石英} + 0.1785 × X_{伊利石总含量} - 0.5531 × X_{伊蒙混层总含量} - 0.1853 × X_{绿泥石总含量}

4) 综合可动性评价模型

考虑到页岩储层具有多尺度孔隙系统的特征, 本研究提出综合可动性指数 (Comprehensive Mobility Index, CMI) 来评价储层的整体可动性。CMI 定义为不同尺度孔隙可动性的加权平均值, 权重系数为各尺度孔隙在总孔隙体积中的占比。这种评价方法能够同时反映大孔和小孔对总体可动性的贡献, 避免了只考虑单一尺度带来的片面性。

CMI 计算公式为:

CMI = 大孔比例 × LPM + 小孔比例 × SPM

根据建立的评价模型, 计算得到各样品的综合可动性指数: ZY1 为 20.78%, GY2 为 14.57%, GY3 为 20.18% (表 3)。

表 3 页岩样品可动性评价结果

Table 3 Mobility evaluation of shale samples

样品编号	大孔比例/%	小孔比例/%	大孔可动性/%	小孔可动性/%
ZY1	71.25	28.75	19.18	24.75
GY2	46.64	53.36	6.03	22.03
GY3	93.12	6.88	18.94	37.04

4.4 润湿性对页岩油采收率的影响机理

4.4.1 单相油体系中润湿性对可动性的控制机制

本研究采用的离心-核磁实验是在饱和油状态下进行的单相流动实验, 不涉及油水两相驱替。在这种条件下, 润湿性通过以下机制影响油相可动性:

(1) 油-岩界面粘附力控制: 对于亲水性矿物表面 (如石英), 油相与固体表面的粘附功较低。根据 Dupré 方程, 粘附功 $W = \sigma(1+\cos\theta)$, 其中 σ 为油-岩界面张力, θ 为油在岩石表面的接触角 (Ou et al., 2025)。强亲水表面的油接触角大 (本研究 122° ~145°), 导致粘附功小, 油相更容易在离心力作用下从孔隙壁面脱离。

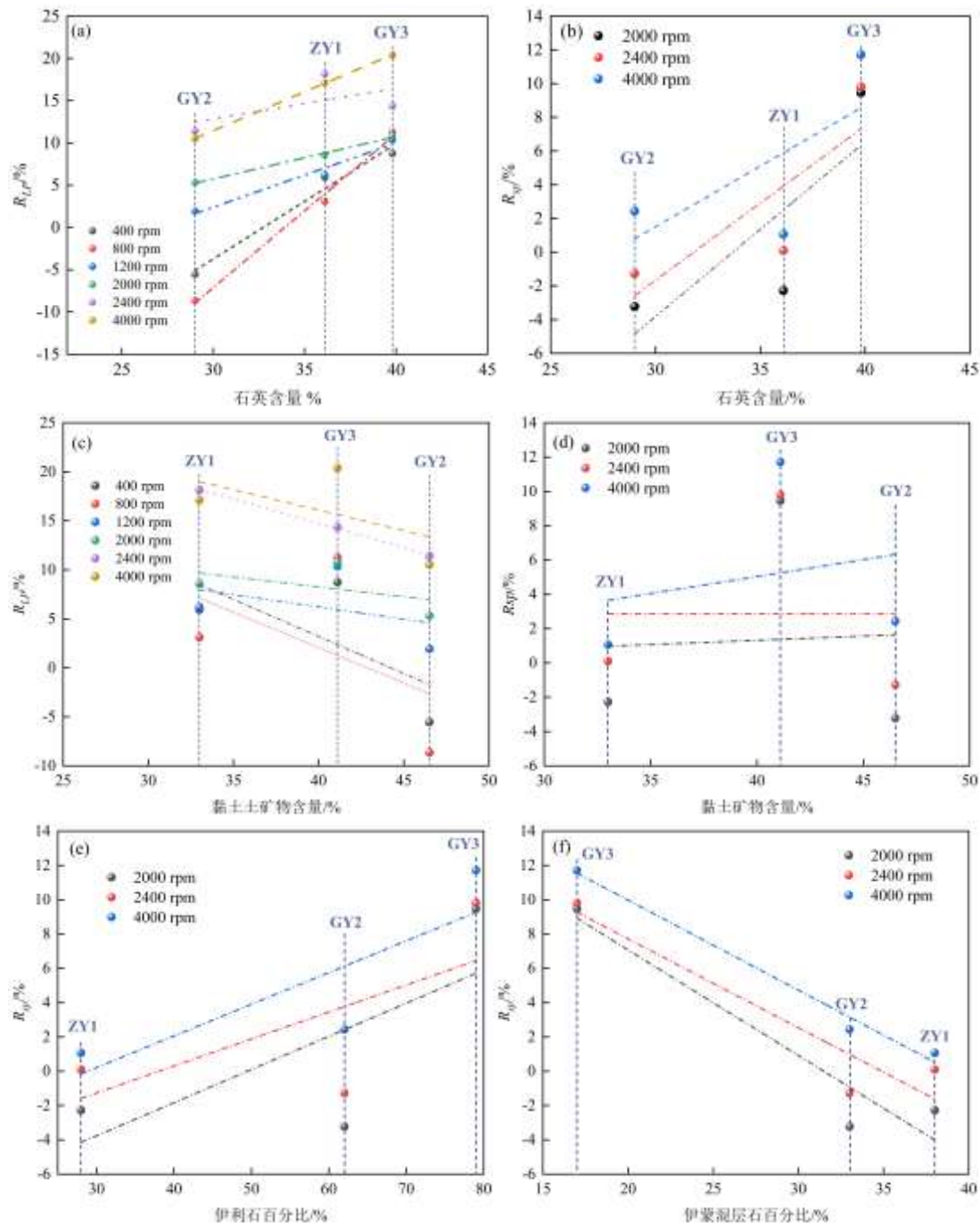
(2) 油相赋存形态差异: 在亲水孔隙中, 油相倾向于以球状或柱状形式占据孔隙中心, 与孔壁接触面积小; 而在相对亲油的孔隙中, 油相可能呈薄膜状铺展在孔壁上, 接触面积大, 需要更高的离心力才能克服粘附作用实现流动。

(3) 毛管束缚力差异: 即使在单相油条件下, 不同润湿性也会导致毛管力差异。亲水孔隙中油相作为非润湿相, 其毛管束缚力相对较小; 而亲油孔隙中油相的毛管束缚力更大, 在相同离心力下更难被驱出。

需要指出的是, 本实验结果主要反映了单相油体系下的可动性特征, 与实际油藏条件存在以下差异: (1) 缺少水相的竞争作用, 可能高估了油相可动性; (2) 未考虑油水界面张力的影响; (3) 离心力场与实际驱替压力梯度存在差异。尽管如此, 本研究结果仍可为理解润湿性对页岩油可动性的基础控制作用提供重要参考。未来研究可考虑开展油水两相驱替实验, 以更准确地评价实际开发条件下的页岩油可动性。

4.4.2 矿物组分对采收率的控制作用

相关性分析结果表明, 石英含量与大、小孔隙的采收率均呈显著正相关关系 (图 7a、图 7b)。这一现象主要归因于石英矿物的表面化学性质: 石英表面富含 Si-OH 官能团 (Zhang et al., 2023), 能够与水分子形成稳定的氢键网络, 形成亲水薄膜层。这种亲水性表面降低了油相与岩石固体界面的粘附强度, 有利于油相在离心力作用下从孔隙中剥离并发生流动。



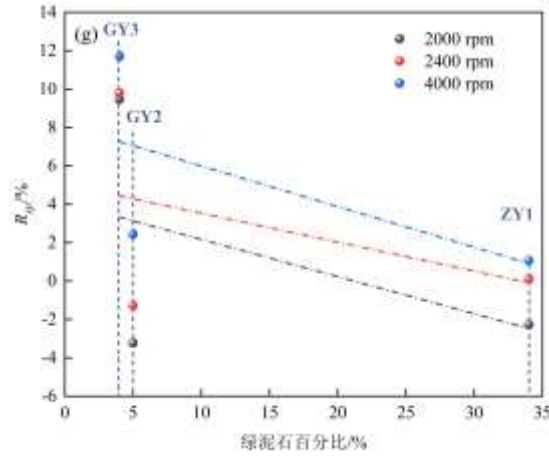


图 7 不同矿物组分含量与 R_{LP} 和 R_{sp} 采收率关系: (a) 不同石英含量下 R_{LP} ; (b) 不同石英含量下 R_{sp} ; (c) 不同黏土含量下 R_{LP} ; (d) 不同黏土含量下 R_{sp} ; (e) 不同伊利石含量下 R_{sp} ; (f) 不同伊蒙混层含量下 R_{sp} ; (g) 不同绿泥石含量下 R_{sp}

Figure 7. Relationship between different mineral component contents and R_{LP} and R_{sp} recovery factors: (a) R_{LP} under different quartz contents; (b) R_{sp} under different quartz contents; (c) R_{LP} under different clay contents; (d) R_{sp} under different clay contents; (e) R_{sp} under different illite contents; (f) R_{sp} under different illite/smectite mixed-layer contents; (g) R_{sp} under different chlorite contents

黏土矿物对采收率的影响呈现明显的孔隙尺度效应 (图 7c、图 7d)。在大孔隙系统中, 黏土矿物含量与采收率呈负相关关系, 这主要是由于黏土矿物在大孔隙中形成复杂的网络结构, 增加了孔隙通道的迂曲度, 从而阻碍油相的有效流动。而在小孔隙系统中, 黏土矿物是构成孔隙骨架的主要成分, 而不仅仅是填充物。此外, 不同类型黏土矿物表现出差异化的影响特征: 伊利石含量与小孔采收率呈正相关关系 (图 7e), 而伊蒙混层和绿泥石含量则呈负相关关系 (图 7f、图 7g)。然而, 这种差异化影响的具体机理尚不明确。从矿物学角度看, 伊利石具有非膨胀的 2:1 型层状结构, 伊蒙混层含有膨胀性组分, 而绿泥石具有 2:1:1 型的复杂层状结构 (Moore et al., 1997)。但是, 这些结构差异如何转化为对油相可动性的不同影响, 还需要针对性的分子层面研究来阐明。

4.5 储层可动性特征评价

4.5.1 储层级别可动性计算

基于建立的可动性评价模型, 可通过两种等效的计算途径获得储层级别的可动性指标:

1) 途径一: 先计算单个样品的可动性, 再进行算术平均

储层大孔可动性 = $(19.18\% + 6.03\% + 18.94\%) / 3 = 14.72\%$

储层小孔可动性 = $(24.75\% + 22.03\% + 37.04\%) / 3 = 27.94\%$

储层平均大孔比例 = $(71.25\% + 46.64\% + 93.12\%) / 3 = 70.34\%$

储层平均小孔比例 = $(28.75\% + 53.36\% + 6.88\%) / 3 = 29.66\%$

储层综合可动性: $14.72\% \times 70.34\% + 27.94\% \times 29.66\% = 18.64\%$

2) 途径二: 先计算储层平均矿物组成参数, 再代入模型计算

首先, 计算储层平均矿物组成:

储层平均石英含量 = $(36.1\% + 29.0\% + 39.8\%) / 3 = 34.97\%$

储层平均黏土总量 = $(33.0\% + 46.5\% + 41.1\%) / 3 = 40.2\%$

储层平均伊利石总含量 = $(9.24\% + 28.83\% + 32.469\%) / 3 = 23.51\%$

储层平均伊蒙混层总含量 = $(12.54\% + 15.345\% + 6.987\%) / 3 = 11.62\%$

储层平均绿泥石总含量 = $(11.22\% + 2.325\% + 1.644\%) / 3 = 5.06\%$

然后，将平均值代入建立的模型：

储层大孔可动性 = $0.9605 \times 34.97\% - 0.4694 \times 40.2\% = 14.72\%$

储层小孔可动性 = $0.7904 \times 32.93\% + 0.2084 \times 22.51\% - 0.5040 \times 11.06\% - 0.2825 \times 6.33\% = 27.94\%$

储层综合可动性 = $70.34\% \times 14.72\% + 29.66\% \times 27.94\% = 18.64\%$

评价方法的两种计算途径在数学上是等价的，结果一致。

4.5.2 甜点优选指导

基于建立的可动性评价模型，为页岩油甜点区优选提供以下理论参考：

(1) 石英含量阈值的初步界定：基于本研究样品数据，石英含量与可动性呈显著正相关。三个高可动性样品（ZY1、GY3）的石英含量均超过 35%，而低可动性样品（GY2）石英含量仅 29%。因此，初步建议将 35% 作为优选阈值。需要说明的是，该阈值基于有限样品得出，其普适性需通过扩大研究区样品数量（建议不少于 20 个）进行验证和优化。

(2) 孔隙结构参数的定量区间：本研究发现孔隙结构均衡性比单纯的大孔占比更重要。ZY1 样品以 71.25% 的大孔占比获得最优综合可动性，而 GY3 样品 93.12% 的极大孔占比反而限制了整体效果。基于现有数据，初步建议大孔占比 60%~80% 作为优选区间。该区间的精确界定需要：①建立更大的样品数据库；②开展不同孔隙结构组合的数值模拟；③结合实际开发动态数据进行验证。

(3) 综合评价指标体系的应用：实际应用中，建议采用本研究建立的 CMI 指数进行定量评价。当 $CMI > 18\%$ 时，可初步判定为甜点区域。但考虑到地质条件的复杂性，建议结合以下工作进一步完善评价标准：①开展区域性矿物组分-可动性数据库建设；②引入地质力学参数（脆性指数等）进行多因素耦合分析；③通过生产井动态数据反馈，不断优化评价模型参数。

4.6 润湿性与可动性的耦合关系分析

为深入揭示润湿性对页岩油可动性的控制机理，本研究将宏微观接触角测量结果与核磁共振评价的可动性数据进行关联分析。通过对比四个样品的润湿性参数与可动性指标，发现两者存在显著的内在联系。GY3 样品表现出最强的亲水性（水接触角 10.23° ）和最小的油水接触角（ 122.3° ），对应着最高的小孔可动性（37.04%）和较高的综合可动性指数（20.18%）。相反，GY2 样品具有最大的水接触角（ 52.52° ），其综合可动性指数最低（14.57%）。

基于上述实验观察，分析认为润湿性通过影响油相在孔隙中的赋存形态来控制其可动性。在亲水孔隙中，油相作为非润湿相主要占据孔隙中心位置，与孔壁接触面积有限，油-岩界面粘附力相对较弱。相比之下，在亲油性较强的孔隙中，油相倾向于在孔壁表面铺展，形成较大的接触面积，需要更高的驱动力才能实现有效剥离。这种赋存形态的差异在核磁共振信号的变化特征中得到了间接反映，为理解润湿性对可动性的控制机制提供了新的视角。通过整合两种独立技术的测量结果，本研究初步建立了润湿性与可动性之间的定性关系、以及矿物组分与可动性的定量关系，但这种关系的普适性仍需通过扩大样本量进一步验证。

5 结论

本文以古龙页岩为研究对象，采用宏微观接触角测量和核磁共振技术分别表征润湿性和可动性特征，通过系统的关联分析揭示了页岩储层润湿性特征及其对油相可动性的控制机理，建立了页岩油多尺度可动性定量评价模型，获得以下主要认识：

(1) 跨尺度润湿性表征方法具有良好的系统一致性。环境扫描电镜测得的微观接触角虽然系统性大于宏观值，但两种方法测量规律一致，验证了多尺度表征的互补性和可靠性。

表面粗糙度对润湿性具有显著影响,粗糙度增加能够增强固液界面亲和力。

(2) 储层品质评价需要综合考虑孔隙结构与可动性的协同效应。研究发现最优储层可能并非大孔占比最高的 GY3 样品(93.12%),而是孔隙结构更均衡的 ZY1 样品(大孔 71.25%、小孔 28.75%),其较高的小孔可动性(24.75%)与适中的孔隙分布共同作用,实现了最高的综合可动性指数(20.78%)。这一发现强调了均衡孔隙结构(大孔占比 60%~80%)的重要性。

(3) 通过润湿性与可动性的关联分析,揭示了润湿性对油相可动性的控制机制。强亲水性样品(GY3)表现出最高的小孔可动性(37.04%),这与油相在亲水孔隙中作为非润湿相、油-岩粘附力较弱有关。润湿性通过影响油相赋存形态控制其可动性,为理解页岩油流动机理提供了新视角。

(4) 建立了考虑矿物组分差异化影响的页岩油多尺度可动性定量评价模型。大孔可动性主要受石英含量正向控制和黏土总量负向控制;小孔可动性机理更为复杂,需要综合考虑石英、伊利石的正向作用和伊蒙混层、绿泥石的负向作用。该评价体系整合了润湿性定性关系和矿物组分定量模型,为页岩油储层评价提供了新方法。

References

- Zou, C.N., Yang, Z., Zhang, G.S., et al., 2023. Theory, Technology and Practice of Unconventional Petroleum Geology. *Earth Science*, 48(6): 2376-2397(in Chinese with English abstract).
- Sun, L.D., Jia, C.Z., Zhang, J.F., et al., 2024. Resource potential of Gulong shale oil in the key areas of Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(12):1699-1714(in Chinese with English abstract).
- Wan, X.F., Liu, C.C., Zhao, D.F., et al., 2023. Hotspot and Development Trend of Shale Oil Research. *Earth Science*, 48(2): 793-813(in Chinese with English abstract).
- Yuan, S.Y., Lei, Z.D., Li, J.S., et al., 2023. Key theoretical and technical issues and countermeasures for effective development of Gulong shale oil, Daqing Oilfield, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(3): 562-572(in Chinese with English abstract).
- Sun, L.D., Liu, H., He W.U., et al., 2021. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China. *Petroleum Exploration and Development*, 48(3): 453-463(in Chinese with English abstract).
- Zhou, B., Wang, W. M., Guo, H.K., 2004. Measurement on Scale of Wettability of Porous Media with NMR Methods. *Earth Science*, 29(4): 495-499(in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.H., Chen, D.X., Xia, Y.X., et al., 2022. Spontaneous Imbibition Characteristics and Influencing Factors of Chang 7 Shale Oil Reservoirs in Longdong Area, Ordos Basin. *Earth Science*, 47(8): 3045-3055(in Chinese with English abstract).
- Huo, X., Sun, L.H., Li, B.W., et al., 2023. Influencing factors and research progress of shale reservoir wettability. *Applied Chemical Industry*, 53(12): 3354-3358(in Chinese with English abstract).
- Yu, C., Zhang, Y.P., Wang, Z.H., et al., 2024. The influence of mineral wettability on the adsorption of shale gas. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 41(2): 35-44(in Chinese with English abstract).
- Xiang, L.Y., Li, C.D., Li, L.H., et al., 2022. Surface Wettability of Ca-montmorillonite Based on Molecular Dynamics Simulation. *Science Technology and Engineering*, 22(36): 15952-15958(in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.N., Luo, X.R., Liu, K.Y., et al., 2021. Impact of chlorites on the wettability of tight oil sandstone reservoirs in the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China. *Science China Earth Sciences*, 64(6): 951-961(in Chinese).
- AlOmier, A., Cha, D., Ayirala, S., et al., 2024. Novel fabrication of mixed wettability micromodels for pore-scale

- studies of fluid–rock interactions. *Lab Chip*, 24(4): 882-895.
- Yang, Y., Cai, M., Chu, Y., et al., 2024. Effect of wettability on fracturing fluid microscale flow in shale oil reservoirs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 67: 500-505.
- He, W.Y., Liu, B., Zhang, J.Y., et al., 2023. Geological Characteristics and Key Scientific and Technological Problems of Gulong Shale Oil in Songliao Basin. *Earth Science*, 48(1): 49-62(in Chinese with English abstract).
- Yu, Y.J., Wang, H.Y., Liu, D.X., et al., 2023. Development Status and Feasibility Evaluation Index System of Continental Shale Oil Demonstration Area in China. *Earth Science*, 48(1): 191-205(in Chinese with English abstract).
- Drelich, J., Miller, J.D., Good, R.J., 1996. The effect of drop (bubble) size on advancing and receding contact angles for heterogeneous and rough solid surfaces as observed with sessile-drop and captive-bubble techniques. *Journal of Colloid and Interface Science*, 179(1): 37-50.
- Ponomar, M., Krasnyuk, E., Butylskii, D., et al., 2022. Sessile drop method: Critical analysis and optimization for measuring the contact angle of an ion-exchange membrane surface. *Membranes*, 12(8): 765.
- Hashemi, L., Glerum, W., Farajzadeh, R., et al., 2021. Contact angle measurement for hydrogen/brine/sandstone system using captive-bubble method relevant for underground hydrogen storage. *Advances in Water Resources*, 154: 103964.
- Sarkar, S., Roy, T., Roy, A., et al., 2021. Revisiting the supplementary relationship of dynamic contact angles measured by sessile-droplet and captive-bubble methods: Role of surface roughness. *Journal of Colloid and Interface Science*, 581: 690-697.
- Loucks, R.G., Reed, R.M., Ruppel, S.C., et al., 2012. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores. *AAPG Bulletin*, 96(6): 1071-1098.
- Shi, K.Y., Chen J.Q., Pang, X.Q., et al., 2024. A review of methods for measuring the wettability of reservoir minerals. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 31(2): 1-9(in Chinese with English abstract).
- Arif, M., Zhang, Y., Iglauer, S., 2021. Shale wettability: data sets, challenges, and outlook. *Energy & Fuels*, 35(4): 2965-2980.
- Donald, A.M., 2003. The use of environmental scanning electron microscopy for imaging wet and insulating materials. *Nature Materials*, 2(8): 511-516.
- Kou, H., Li, W., Zhang, X., et al., 2019. Temperature-dependent coefficient of surface tension prediction model without arbitrary parameters. *Fluid Phase Equilibria*, 484: 53-59.
- Oosterlaken, B.M., de With, G., 2022. How Reliable Are Surface Tension Data?. *Accounts of Materials Research*, 3(9).
- Wang, X.Y., Ke, P., Du, F., 2024. Research on the Dynamic Contact Angle Model for the Droplet Impact Process. *Applied Mathematics and Mechanics*, 45(9): 1133-1146(in Chinese with English abstract).
- Wei, Y.Q., Zhang, J., Jiang, B., et al., 2025. Tribological Properties for the Interaction of Point Contact Interface. *Tribology*, 46(2):1-13(in Chinese with English abstract).
- Klauser, W., von Kleist-Retzow, F.T., Fatikow, S., 2022. Line Tension and Drop Size Dependence of Contact Angle at the Nanoscale. *Nanomaterials*, 12(3): 369.
- Jasper, W.J., Rasipuram, S., 2017. Relationship between contact angle and contact line radius for micro to atto liter size oil droplets. *Journal of Molecular Liquids*, 248: 920-926.
- Cassie, A.B.D., Baxter, S., 1944. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society*, 40.
- Zhang, B., Wang, J., Liu, Z., et al., 2014. Beyond Cassie equation: Local structure of heterogeneous surfaces determines the contact angles of microdroplets. *Scientific Reports*, 4: 5822.
- Rao, S., Deng, Y., Cai, W., et al., 2021. Study of the contact angle of water droplet on the surface of natural K-feldspar with the combination of Ar⁺ polishing and atomic force microscopy scanning. *Chemical Engineering*

- Science*, 241: 116705.
- AlRatrou, A., Blunt, M.J., Bijeljic, B., 2018. Wettability in complex porous materials, the mixed-wet state, and its relationship to surface roughness. *PNAS*, 115(36): 8901-8906.
- Ni, J.W., Cao Z.Y., Pan, J., et al., 2024. Study on construction of micro-nano structure and hydrophobicity of Ni-Ti alloy surface. *Machine Tool & Hydraulics*, 52(4): 44-49(in Chinese with English abstract).
- Tzitzilis, D., Tsekeridis, C., Ntakoumis, I., et al., 2024. Transition of Liquid Drops on Microstructured Hydrophobic Surfaces from the Impaled Wenzel State to the "Fakir" Cassie–Baxter State. *Langmuir*, 40(26): 13422-13427.
- Yang, T., 2022. Research on Micromechanical Properties of Breccia based on Atomic Force Microscope. *Fly Ash Comprehensive Utilization*, 36(3): 29-35,93(in Chinese with English abstract).
- Ou, J.F., Amirfazli, A., Chini, S.F., 2025. The sessile drop work of adhesion revisited. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 136: 103872.
- Zhang, H.L., Xu, Z.J., Sun, W., et al., 2023. Hydroxylation structure of quartz surface and its molecular hydrophobicity. *Applied Surface Science*, 612: 155884.
- Moore, D.M., Reynolds, R.C., 1997. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford: Oxford University Press.

中文参考文献

- 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 2023. 非常规油气地质学理论技术及实践. 地球科学, 48(6): 2376-2397.
- 孙龙德, 贾承造, 张君峰, 等. 2024. 松辽盆地古龙页岩油重点地区资源潜力. 石油学报, 45(12): 1699-1714.
- 万晓帆, 刘丛丛, 赵德锋, 等. 2023. 页岩油研究热点与发展趋势. 地球科学, 48(2): 793-813.
- 袁士义, 雷征东, 李军诗, 等. 2023. 古龙页岩油有效开发关键理论技术问题与对策. 石油勘探与开发, 50(3): 562-572.
- 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 2021. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析. 石油勘探与开发, 48(3): 453-463.
- 周波, 王为民, 郭和坤, 等. 2004. 孔隙介质润湿性的核磁共振刻度特征的测量. 地球科学, 29(4): 495-499.
- 周小航, 陈冬霞, 夏宇轩, 等. 2022. 鄂尔多斯盆地陇东地区长 7 段页岩油储层自发渗吸特征及影响因素. 地球科学, 47(8): 3045-3055.
- 霍旭, 孙灵辉, 李博文, 等. 2023. 页岩储层润湿性的影响因素及研究进展. 应用化工, 53(12): 3354-3358.
- 余曹, 张玉苹, 汪周华, 等. 2024. 页岩矿物不同润湿性表征与吸附微观机理. 原子与分子物理学报, 41(2): 35-44.
- 项林语, 李长冬, 李浩林, 等. 2022. 基于分子动力学模拟的钙基蒙脱石表面润湿性研究. 科学技术与工程, 22(36): 15952-15958.
- 王忠楠, 罗晓容, 刘可禹, 等. 2021. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组致密砂岩储层绿泥石对润湿性的影响. 中国科学: 地球科学, 51(7): 1123-1134.
- 何文渊, 柳波, 张金友, 等. 2023. 松辽盆地古龙页岩油地质特征及关键科学问题探索. 地球科学, 48(1): 49-62.
- 蔚远江, 王红岩, 刘德勋, 等. 2023. 中国陆相页岩油示范区发展现状及建设可行性评价指标体系. 地球科学, 48(1): 191-205.
- 施欣园, 陈君青, 庞雄奇, 等. 2024. 储层矿物润湿性的测量方法综述. 特种油气藏, 31(2): 1-9.
- 王翔宇, 柯鹏, 杜锋. 2024. 液滴冲击过程动态接触角模型研究. 应用数学和力学, 45(9): 1133-1146.
- 魏永峭, 张晋, 蒋兵, 等. 2025. 基于点接触界面相互作用的摩擦学性能研究. 摩擦学学报(中英文), 46(2):

1-13.

倪家伟, 曹自洋, 潘杰, 等. 2024. 镍钛合金表面微纳结构构建及其疏水性能研究. 机床与液压, 52(4): 44-49, 55.

杨涛. 2022. 基于原子力显微镜的角砾岩微观力学性质研究. 粉煤灰综合利用, 36(3): 29-35, 93.