

引用格式:王大兴,曾治平,胡海燕,等.准噶尔盆地中部下乌尔禾组深层陆相页岩孔隙结构分形特征及其地质意义[J].油气地质与采收率,2024,31(1):23-35.

WANG Daxing, ZENG Zhiping, HU Haiyan, et al. Fractal characteristics of pore structure of deep continental shale of Lower Wuerhe Formation in central Junggar Basin and its geological significance[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(1):23-35.

## 准噶尔盆地中部下乌尔禾组深层陆相页岩孔隙结构分形特征及其地质意义

王大兴<sup>1</sup>, 曾治平<sup>2</sup>, 胡海燕<sup>1</sup>, 王涛<sup>3</sup>, 朱根根<sup>1</sup>, 李松涛<sup>2</sup>, 李凌<sup>2</sup>

(1. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100; 2. 中国石化胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015;

3. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

**摘要:**为明确准噶尔盆地中部下乌尔禾组深层陆相页岩孔隙结构以及分形特征,以东道海子凹陷下乌尔禾组页岩为研究对象,在深入剖析页岩矿物及地球化学特征的基础上,采用场发射扫描电镜、低温 $N_2$ 吸附等研究方法,定量表征下乌尔禾组页岩孔隙结构特征,并基于FHH模型计算页岩孔隙的分形维数,揭示总有机碳含量(TOC)、矿物组分、孔隙结构参数和分形维数的关系及其地质意义。研究表明,研究区下乌尔禾组页岩主要发育无机孔和微裂缝,孔径分布呈多峰型,以平行板状或窄缝状孔隙为主;页岩孔隙发育受TOC和石英、长石、黏土矿物含量的控制,导致孔隙结构之间差异性较大,非均质性强。研究区下乌尔禾组页岩孔隙具有双重分形特征,其中表面分形维数( $D_1$ )为2.452 2~2.594 8,平均为2.540 9;结构分形维数( $D_2$ )为2.604 5~2.774 8,平均为2.705 6。TOC与分形维数呈负相关,孔隙结构参数(比表面积和孔体积)和矿物组分(石英、长石以及黏土矿物)含量与分形维数呈正相关。脆性矿物(石英、长石)和黏土矿物含量的增加有助于微纳米尺度孔隙以及微裂缝的发育,比表面积和孔体积增大,分形维数也增加,孔隙非均质性强,孔隙结构越复杂。

**关键词:**陆相页岩;微观孔隙结构;分形特征;下乌尔禾组;准噶尔盆地

文章编号:1009-9603(2024)01-0023-13

DOI:10.13673/j.pgre.202305002

中图分类号:TE122.2<sup>+</sup>3

文献标识码:A

## Fractal characteristics of pore structure of deep continental shale of Lower Wuerhe Formation in central Junggar Basin and its geological significance

WANG Daxing<sup>1</sup>, ZENG Zhiping<sup>2</sup>, HU Haiyan<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>3</sup>, ZHU Gengen<sup>1</sup>, LI Songtao<sup>2</sup>, LI Ling<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 2. Exploration and Development Research Institute of Shengli Oilfield Company of SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China;

3. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China)

**Abstract:** In order to clarify the pore structure and fractal characteristics of the deep continental shale of the Lower Wuerhe Formation in the central Junggar Basin, the Lower Wuerhe Formation shale in the Dongdaohaizi Sag was taken as the research object. On the basis of an in-depth analysis of shale minerals and geochemical characteristics, the pore structure characteristics of the Lower Wuerhe Formation shale were quantitatively characterized by using field emission scanning electron microscopy and low-temperature  $N_2$  adsorption experiments. The fractal dimension of shale pores was calculated based on the FHH model, and the relationships among TOC content, mineral composition, pore structure parameters, fractal dimension, and its geological significance

收稿日期:2023-05-02。

作者简介:王大兴(1997—),男,贵州开阳人,在读硕士研究生,从事非常规油气地质方面的研究。E-mail:2021720593@yangtzeu.edu.cn。

通信作者:胡海燕(1977—),男,河南三门峡人,教授,博士。E-mail:hyhucom@163.com。

基金项目:中国石化重大科技项目“准噶尔盆地及周缘矿权战略选区及评价研究”(P21086-4)。

were revealed. The results show that the Lower Wuerhe Formation shale mainly develops inorganic pores and micro-fractures, and the pore size distribution is multi-peak type, mostly parallel plate or narrow slit pores. The pore development of shale is controlled by *TOC* and the content of quartz, feldspar, and clay minerals, which results in significant differences and strong heterogeneity among pore structures. Shale pores of the Lower Wuerhe Formation in the study area have double fractal characteristics, in which the surface fractal dimension  $D_1$  varies from 2.452 2 to 2.594 8, with an average value of 2.540 9. The fractal dimension  $D_2$  of the structure ranges from 2.604 5 to 2.774 8, with an average of 2.705 6. *TOC* is negatively correlated with fractal dimension, while pore structure parameters (specific surface area and pore volume) and mineral composition (quartz, feldspar, and clay mineral content) are positively correlated with fractal dimension. An increase in the content of brittle minerals such as quartz, feldspar and clay minerals contributes to the development of micro- and nano-scale pores and micro-fractures. This results in an increase in specific surface area, pore volume, and fractal dimension. As pore heterogeneity strengthens, the complexity of the pore structure also increases.

**Key words:** continental shale; microscopic pore structure; fractal characteristics; Lower Wuerhe Formation; Junggar Basin

随着我国海相页岩气的成功开发,陆相页岩气藏受到越来越多的关注,逐渐成为页岩油气勘探开发的新领域<sup>[1]</sup>。陆相页岩气形成于暗色富有机质页岩或其夹层中,赋存于陆相页岩中<sup>[2]</sup>。根据国土资源部“十三五”规划对全国油气资源评价结果(2020年),我国页岩气技术可采资源量为 $20 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,其中陆相页岩气技术可采资源量为 $1.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,占7%,资源潜力丰富<sup>[3]</sup>。陆相页岩分布较广,在华北及东北地区、西北地区、上扬子及滇黔桂地区、中下扬子及东南地区均有分布,但仍处于勘探开发的早期阶段,目前仅在鄂尔多斯盆地、松辽盆地以及四川盆地获得工业气流<sup>[3-4]</sup>。陆相页岩气巨大的资源潜力使其成为页岩气资源评价研究的热点,了解其孔隙结构特征以及关键控制因素对页岩储层评价具有重要意义。

页岩作为一种具有复杂孔隙结构的多孔非均质材料,发育从纳米到微米尺度不等的孔隙<sup>[5-7]</sup>。相比于常规气藏,页岩气藏具有自生自储的特征,即页岩储层既是生气层也是储层,发育位置与暗色泥页岩的分布相关,一般呈连续性、区域性分布<sup>[8]</sup>。根据赋存状态的差异,页岩气主要以游离态赋存于储层孔隙和天然裂缝中,或吸附于孔隙表面<sup>[9]</sup>。页岩孔隙结构控制着页岩气的赋存状态,孔隙结构越复杂,页岩对气体的吸附能力越强<sup>[8-9]</sup>。因此,明确孔隙结构对陆相页岩储层的评价、气体赋存和流动机制研究具有重要意义。前人对页岩孔隙结构的研究已经开展了大量工作<sup>[10-12]</sup>,主要研究技术包括图像分析法、流体注入法以及非物质注入法<sup>[13]</sup>。基于聚离子束扫描电镜(FIB-SEM)、场发射扫描电镜(FE-SEM)、原子力显微镜(AFM)以及透射电子显微镜(TEM)等微区观察技术可以得到孔隙连通性和形态特征等<sup>[14-18]</sup>;高压压汞法、低温 $\text{N}_2$ 吸附、低压

$\text{CO}_2$ 吸附等流体注入法可以定量分析页岩孔隙结构参数<sup>[19-21]</sup>,包括孔隙比表面积、孔体积、平均孔径等;非物质注入法包括核磁共振(NMR)、小角散射(SANS)以及超小角散射(USANS)等技术,可以得到无损且真实性较高的孔体积和孔径分布等<sup>[22-25]</sup>。其中,对于微孔( $< 2 \text{ nm}$ )的表征普遍采用低压 $\text{CO}_2$ 吸附实验,介孔( $2 \sim 50 \text{ nm}$ )及大孔( $50 \sim 300 \text{ nm}$ )则采用低温 $\text{N}_2$ 吸附实验,孔径超过 $300 \text{ nm}$ 的大孔则采用高压压汞技术<sup>[21]</sup>。分形维数( $D$ )可以表征页岩孔隙的复杂程度,其值为 $2 \sim 3$ , $D$ 越接近3,表明孔隙结构越复杂,非均质性越强<sup>[24-27]</sup>。分形维数主要是与高压压汞法、气体吸附法以及图像分析法联合使用,常用的计算模型包括FHH、V-S、D-R以及BET等,其中FHH模型的应用最为普遍<sup>[26-27]</sup>。近年来,基于低温 $\text{N}_2$ 吸附的FHH模型已然成为表征页岩孔隙结构特征的常用方法,该方法在海相页岩和过渡相页岩的应用研究较多,在陆相页岩的相对较少。

准噶尔盆地非常规油气资源丰富,类型众多,包括煤层气、页岩气、油页岩等,具有良好的勘探开发潜力,但准噶尔盆地各个区域的勘探开发程度各不相同,对于盆地中部下乌尔禾组页岩孔隙结构特征以及影响因素研究较少。因此,笔者以准噶尔盆地中部东道海子凹陷下乌尔禾组( $\text{P}_2\text{w}$ )陆相页岩为研究对象,通过总有机碳含量(*TOC*)测定、成熟度测试、场发射扫描电镜以及气体吸附实验( $\text{N}_2$ 和 $\text{CO}_2$ )等,结合FHH模型,对页岩孔隙结构特征进行定性和定量分析;并探讨*TOC*以及矿物组分与孔隙结构参数和分形维数的关系,以期为准噶尔盆地中部陆相页岩储层的有利区优选及资源评价提供科学依据。

# 1 区域地质背景

准噶尔盆地是一个大型的叠合盆地,地处塔里木地块、哈萨克斯坦地块和西伯利亚地块的交界处,隶属于哈萨克斯坦地块<sup>[28]</sup>。东道海子凹陷地处准噶尔盆地中央拗陷东北部,整个区域被4个凸起、2个凹陷包围(图1a),分别为滴南凸起、莫北凸起、莫索湾凸起、白家海凸起、五彩湾凹陷和阜康凹陷<sup>[29]</sup>。地层发育相对完整,大部分为平稳地层;凹陷内部断裂不发育。东道海子凹陷整体东窄西宽,面积约为7×10<sup>3</sup> km<sup>2</sup>,是一个类似于葫芦状的凹陷(图1b)<sup>[30]</sup>。其中,在凹陷西部二叠系发育下乌尔禾组,而在东北部斜坡二叠系则发育平地泉组;在下乌尔禾组底部发育含砾粉砂岩,中上部发育深灰色泥岩夹粉细砂岩或泥质粉砂岩,灰黑色、深灰色沉凝灰岩以及砂岩(图1c)<sup>[31]</sup>。以往的研究表明,准噶尔盆地二叠系优质烃源岩主要为下乌尔禾组(东南地区为芦苇沟组和平地泉组)以及风城

组,已然证实莫北油气田、石西油田及莫索湾油气田等油气均来源于下乌尔禾组,表明其生烃潜力巨大<sup>[31]</sup>。

# 2 样品采集及实验方法

## 2.1 实验样品

本次研究所采用的陆相页岩样品取自准噶尔盆地东道海子凹陷东北部C6井二叠系下乌尔禾组岩心,取样深度为6 494.2~6 499.8 m。

## 2.2 实验方法

### 2.2.1 总有机碳含量测定

总有机碳含量的测定采用力可公司生产的CS230定碳定硫分析仪,实验前需将样品粉碎至100目以下,并采用1:7的稀盐酸对样品粉末进行酸洗处理,以去除样品中的无机碳,将酸洗处理后的样品进行烘干处理,最后将样品置于高温(930℃)氧气流中煅烧,测试依据GB/T 19145—2003<sup>[32]</sup>,通过固态红外吸收法计算总有机碳含量。

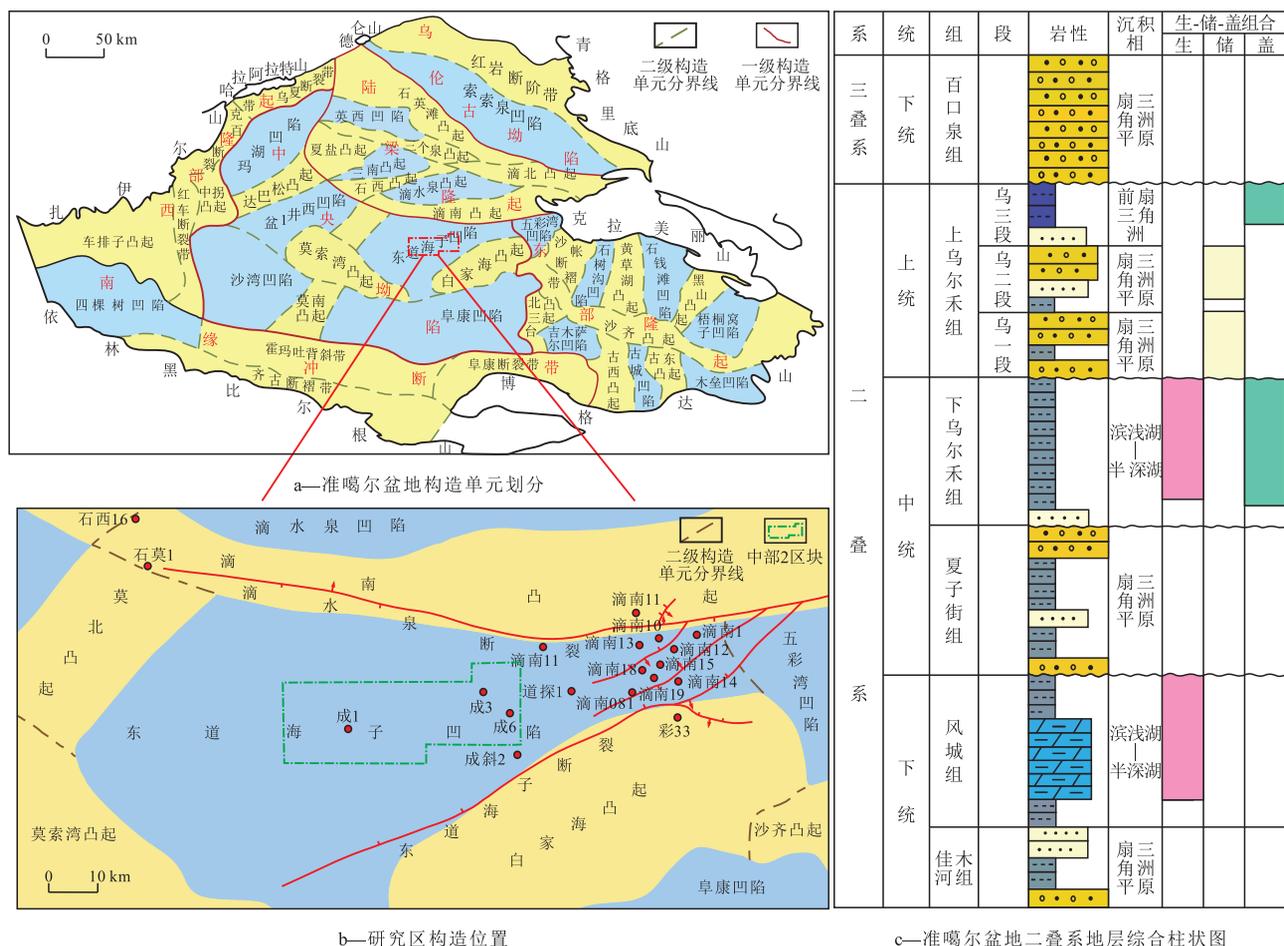


图1 准噶尔盆地中部构造位置及地层综合柱状图  
Fig.1 Structure location and comprehensive column chart of strata in central Junggar Basin

镜质体反射率测定采用最常用的光学方法,它是通过干酪根的显微检查和光电倍增器分析粒子的反射率来实现的,依据SY/T 5124—2012<sup>[33]</sup>。

### 2.2.2 XRD全岩衍射实验

全岩矿物组分及含量通过X射线衍射实验进行,实验仪器为德国Bruker公司生产的多功能X射线衍射仪,型号为D8ADVANCE。测试仪器采用Cu靶,实验前采用玛瑙研磨器将低温干燥处理后的样品研磨至200目以上,控制样品质量在0.5 g以上。测试在室温条件下进行,实验过程中设置仪器电压及电流分别为40 kV与5 mA,整个测试过程依照SY/T 5163—2018<sup>[34]</sup>进行。

### 2.2.3 场发射电镜(FE-SEM)扫描成像

页岩孔隙结构观察采用日立公司生产的SU8010场发射电子显微镜,实验开始前,需要将样品制成规格为1.5 cm×1 cm×0.5 cm的立方块;并采用抛光仪对样品进行氩离子抛光处理,处理完成后,在SU8010场发射电子显微镜下进行观察,分辨率为1.0 nm,加速电压为0.1~30 kV,观测倍率为20~200万倍;最后进行FE-SEM成像。

### 2.2.4 低温N<sub>2</sub>与低压CO<sub>2</sub>吸附实验

低温N<sub>2</sub>与低压CO<sub>2</sub>吸附采用美国康塔公司生产的Autosorb-iQ全自动比表面和孔径分析仪,实验开始前,需要采用去离子水对页岩进行反复清洗,以达到去除页岩表面杂质的效果,之后对样品进行低温烘干处理;将烘干之后的样品置于玛瑙研磨器中并粉碎至20~60目。将粉末状样品置于脱气站进行长达10 h的脱气处理,紧接着将脱气处理完成的样品放入分析站,采用纯度大于99.999%的液氮作为吸附质,在77.3 K完成测试。其中,分别采用Barret-Joyner-Halenda (BJH)和Brunauer-Emmett-Teller (BET)理论结合N<sub>2</sub>吸附实验数据对介孔的比表面积和孔体积进行测定。

### 2.3 分形维数计算方法

页岩孔隙结构复杂程度较高,非均质性强,由法国数学家Mandelbort提出的分形理论能够精确表征页岩孔隙结构的复杂程度<sup>[7]</sup>。低温N<sub>2</sub>吸附实验结果表明,下乌尔禾组页岩的吸附曲线与脱附曲线发生了明显的分离现象,结合等温线以及迟滞环类型,认为下乌尔禾组页岩以发育微孔和介孔为主,与FHH模型适用孔径范围一致<sup>[7-9]</sup>。因此,采用基于低温N<sub>2</sub>吸附的FHH模型计算的页岩分形维数,计算公式为:

$$\ln V = A \ln \ln(P_0/P) + C \quad (1)$$

$$D = A + 3 \quad (2)$$

采用FHH模型计算介孔分形维数,需注意N<sub>2</sub>在介孔吸附过程中会存在多分子层吸附现象,且吸附过程会受到毛细管凝聚作用的影响<sup>[9]</sup>,基于以上影响因素,采用(2)式计算介孔分形维数,其值为2~3, D值越接近于3,表明孔隙越复杂,非均质性越强。

## 3 实验结果

### 3.1 页岩地球化学及矿物组分特征

研究区下乌尔禾组陆相页岩TOC值为0.29%~2.06%,平均为0.72%;有机质成熟度(R<sub>o</sub>)为1.30%~1.55%,平均为1.47%(表1),表明有机质正处于大量生烃阶段。XRD全岩衍射实验结果显示,下乌尔禾组页岩矿物组成复杂,主要由石英、长石和黏土矿物组成,同时含有少量的方解石、白云石以及黄铁矿。其中,石英含量为3.4%~33.2%,平均为22.9%;黏土矿物含量为3.8%~40.6%,平均为27.6%;长石含量为2.3%~44.7%,平均为27.2%(表1)。相比于海相和海陆过渡相页岩<sup>[10-12]</sup>,研究区页岩表现出石英含量低、长石与黏土矿物含量高的特点。

表1 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩TOC、有机质成熟度以及矿物组分

Table1 TOC, maturity of organic matter, and mineral composition of shale samples from Lower Wuerhe Formation in central Junggar Basin

样品 编号	TOC/%	R <sub>o</sub> /%	矿物含量 /%					黏土 矿物
			石英	长石	方解石	白云石	黄铁矿	
C6-1	2.06	1.54	22.5	44.7	0.2	1.2	1.7	29.7
C6-2	1.03	1.48	18.5	9.8	2.0	61.5	1.6	6.3
C6-3	0.35	1.49	28.2	30.6	4.3	—	—	36.9
C6-4	0.42	1.44	25.4	40.6	—	2.3	0.3	31.4
C6-5	0.46	1.54	23.8	31.0	4.4	1.5	1.7	37.6
C6-6	0.29	1.30	3.4	2.3	0.9	86.8	2.8	3.8
C6-7	0.61	1.43	27.5	36.0	1.7	—	—	34.8
C6-8	0.54	1.55	33.2	22.7	2.8	0.7	—	40.6

### 3.2 页岩孔隙形貌特征

FE-SEM扫描电镜结果显示,下乌尔禾组页岩孔隙结构相对简单,普遍发育有机孔、无机孔和微裂缝,其中无机孔包括粒内孔、粒间孔和晶间孔<sup>[35]</sup>。有机质较为发育(图2a),但有机孔发育程度较差(图2b,2c),在区域分布上受到有机质位置的控制,形态变化较大,主要以椭圆状和不规则状为主。前

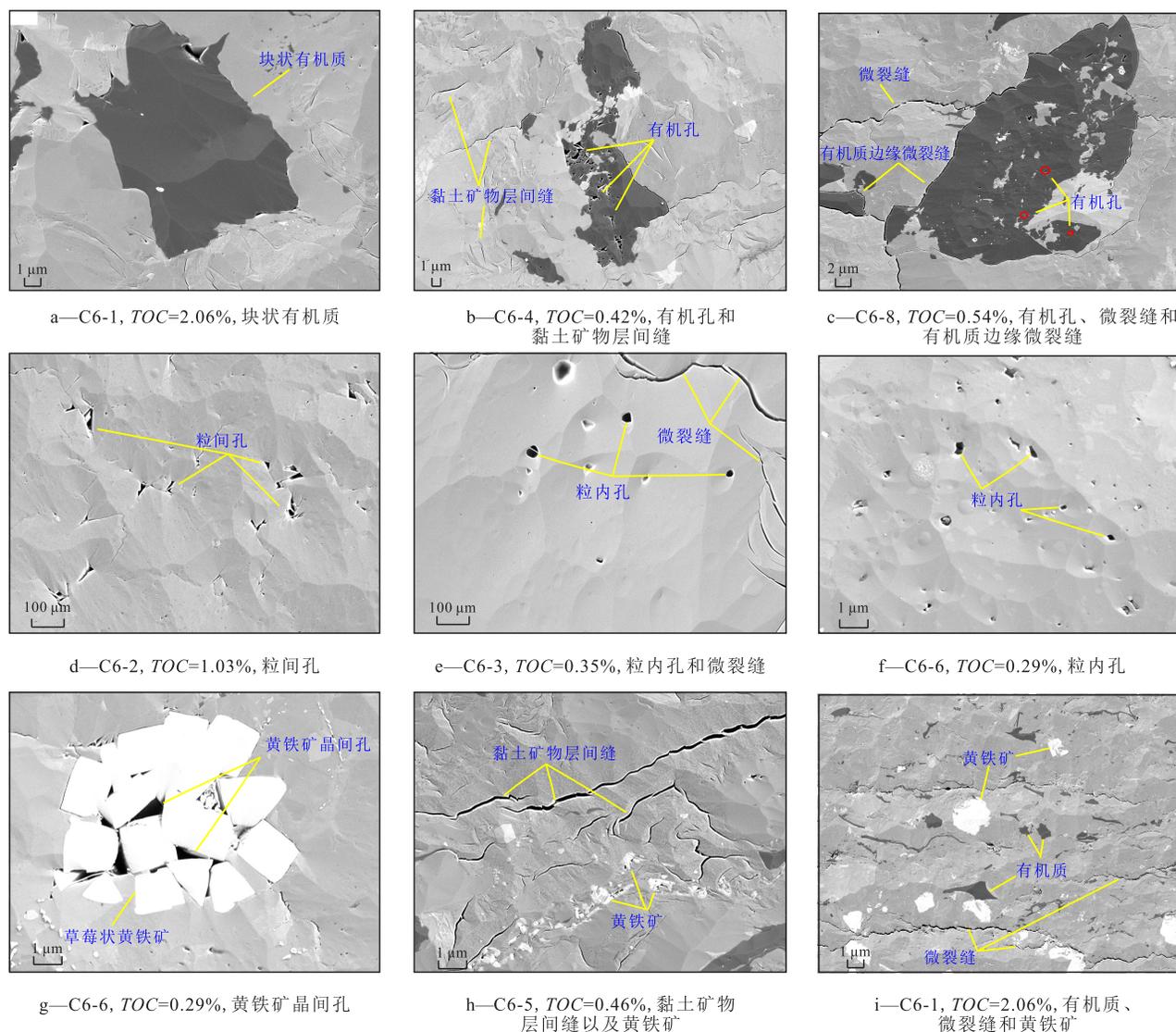


图2 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩扫描电镜图片

Fig.2 SEM images of shale samples from Lower Wuerhe Formation in central Junggar Basin

人研究表明,有机孔的发育受到有机质丰度及有机质类型和固体沥青等因素的控制<sup>[36-39]</sup>。有机质含量越高,有机孔越发育;下乌尔禾组页岩有机质含量整体较低,对有机孔的发育程度会造成一定的影响。此外,有机孔不发育可能与有机质类型有关。杨超等认为腐殖型干酪根生烃潜力较弱,无论有机质成熟度高还是低,其有机孔发育均较差<sup>[37]</sup>;腐泥型干酪根在生油窗阶段会产生原油,导致在高-过成熟阶段产生大量气孔,进而使得有机孔发育。下乌尔禾组页岩以Ⅲ型干酪根(腐殖型干酪根)为主,有机孔不发育,与前人的研究相一致<sup>[37-39]</sup>。

无机孔在研究区较为发育,其中粒间孔多以不规则状为主(图2d),孔径相对较大,主要发育在刚性颗粒之间,分布较为分散,这类孔隙受成岩作用影响较大<sup>[40]</sup>。粒内孔相对于粒间孔更为发育,以椭圆形、近圆形以及四边形为主(图2e,2f),孔径分布

较广,从几纳米到几微米均有分布,发育位置随机,呈无序状分布,连通性较差;这类孔隙多数由有机质生烃以及成岩作用过程中产生的酸性流体经过溶蚀作用形成<sup>[40]</sup>。黄铁矿晶体之中晶间孔发育(图2g),这类孔隙主要是大量的黄铁矿在生长过程中由于不紧密排列堆积形成的<sup>[41]</sup>,其孔径可达几微米,连通性较好。

下乌尔禾组页岩微裂缝按照发育位置可分为有机质边缘微裂缝和黏土矿物层间缝;黏土矿物层间缝主要以狭缝状以及不规则棱角状为主(图2h),长度较长,孔径较小,连通性较好,主要是成岩作用过程中黏土矿物由于脱水干缩形成,主要发育于黏土矿物内部或边界<sup>[40]</sup>;有机质边缘微裂缝主要发育于有机质边缘(图2c),是有机质热演化生烃过程中产生异常高压形成的。此外,下乌尔禾组页岩还发育其他类型的微裂缝(图2e,2i),缝长达数微米,延

展较好。

### 3.3 孔隙结构特征

#### 3.3.1 N<sub>2</sub>吸附等温线

研究区下乌尔禾组页岩的低温N<sub>2</sub>吸附曲线(图3)显示,吸附等温线之间存在一定的相似性,但不同样品之间仍存在一定的差异。根据IUPAC所提出的等温线划分方案<sup>[35]</sup>,可将下乌尔禾组页岩等温线类型划分为IV型。由于毛细管凝聚作用的存在,吸附曲线与脱附曲线之间发生了明显的分离,吸附曲线气体吸附量明显低于脱附曲线气体吸附量,形成了吸附滞后现象,产生滞后环。依据IUPAC的滞后环分类<sup>[35]</sup>,将其分为H3和H4型,多出现于板状颗粒聚集处,形成平行板状或窄缝状孔隙<sup>[35]</sup>。根据N<sub>2</sub>等温吸附曲线的变化趋势大致可分3个阶段:①当相对压力( $P/P_0$ )为0~0.3时,吸附曲线平缓上升,并呈轻微的上凸; $P/P_0$ 为0.3时,在孔隙表面的单分子层吸附基本饱和并向多分子层吸附过渡。②当

$P/P_0$ 为0.3~0.9时,气体吸附量随相对压力的增加而快速增加。③当 $P/P_0$ 为0.9~1.0时,气体吸附量随相对压力的增加而急剧增加,并且在相对压力接近于1.0时,已达到吸附饱和状态。

由表2可知,下乌尔禾组页岩介孔比表面积为3.204~31.279 m<sup>2</sup>/g,平均为20.718 m<sup>2</sup>/g;介孔体积为0.008~0.053 cm<sup>3</sup>/g,平均为0.039 cm<sup>3</sup>/g;平均孔径为1.273~4.887 nm,平均为3.785 nm。基于低温N<sub>2</sub>吸附实验的孔径分布曲线(图4)显示,累积孔体积随孔径的增大而增大,最大累积吸附量为0.053 cm<sup>3</sup>/g;孔径呈多峰分布特征,变化范围较大。

#### 3.3.2 CO<sub>2</sub>吸附等温线

研究区下乌尔禾组页岩低压CO<sub>2</sub>吸附曲线(图5)表明,曲线类型为IV型等温线,表明微孔(<2 nm)大量发育。所有样品的吸附-脱附曲线皆重合,表明在低压环境下微孔并无毛细管凝聚现象发生<sup>[9]</sup>。研究表明,CO<sub>2</sub>吸附量与TOC相关,TOC值越大,CO<sub>2</sub>

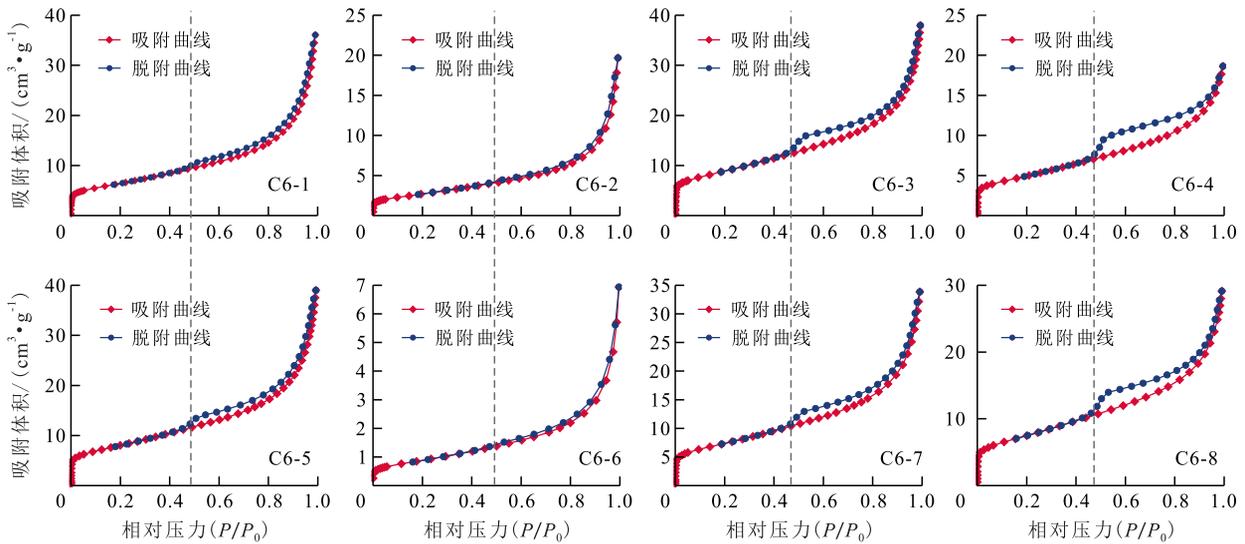


图3 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩低温N<sub>2</sub>吸附曲线

Fig.3 Low-temperature N<sub>2</sub> adsorption curve of Lower Wuerhe Formation shale in central Junggar Basin

表2 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩孔隙结构参数

Table2 Pore structure parameters of Lower Wuerhe Formation shale in central Junggar Basin

样品编号	低温 N <sub>2</sub> 吸附			低压 CO <sub>2</sub> 吸附		
	BET 比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	BJH 孔体积/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm	DFT 比表面积/ (m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	DFT 孔体积/ (cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	平均孔径/nm
C6-1	22.835	0.050	4.411	19.893	0.006	0.349
C6-2	9.784	0.026	4.887	11.565	0.003	0.349
C6-3	31.279	0.052	1.273	21.810	0.007	0.349
C6-4	17.609	0.026	4.887	12.250	0.004	0.349
C6-5	28.514	0.053	1.273	21.555	0.007	0.349
C6-6	3.204	0.008	4.887	4.712	0.001	0.349
C6-7	26.088	0.047	4.887	19.147	0.006	0.349
C6-8	26.427	0.041	3.775	18.756	0.006	0.349

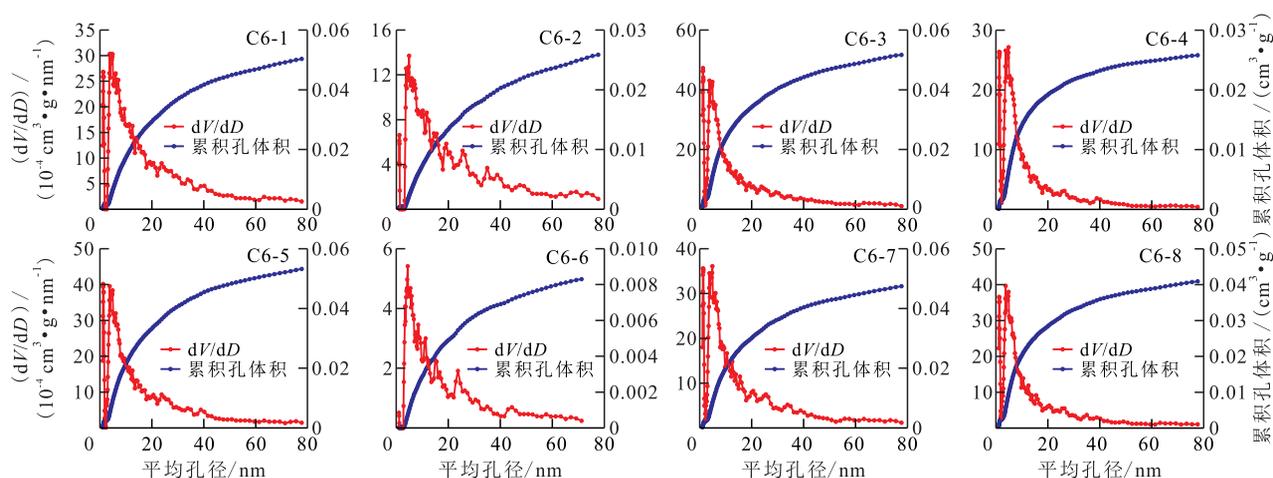


图4 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩基于低温N<sub>2</sub>吸附实验的孔径分布曲线

Fig.4 Pore size distribution curve of Lower Wuerhe Formation shale in central Junggar Basin based on low-temperature N<sub>2</sub> adsorption experiment

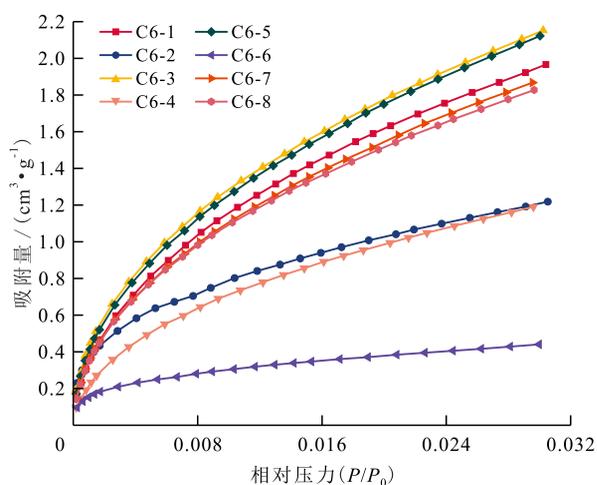


图5 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩低压CO<sub>2</sub>吸附曲线

Fig.5 Low-pressure CO<sub>2</sub> adsorption curve of shale samples from Lower Wuerhe Formation in central Junggar Basin

吸附量越高,同时表明微孔具有更大的孔体积,反映出微孔发育受TOC的控制<sup>[17]</sup>。其中样品C6-6的CO<sub>2</sub>吸附量最小,为0.440 cm<sup>3</sup>/g;样品C6-3的CO<sub>2</sub>吸附量最大,为2.152 cm<sup>3</sup>/g。

由表2可知,低压CO<sub>2</sub>吸附微孔比表面积为4.712 ~ 21.810 m<sup>2</sup>/g,平均为16.211 m<sup>2</sup>/g;孔体积为0.001 ~ 0.007 cm<sup>3</sup>/g,平均为0.005 cm<sup>3</sup>/g。微孔孔径分布曲线(图6)显示,微孔孔径呈多峰型分布,3个主峰主要分布于0.3 ~ 0.4, 0.5 ~ 0.6, 0.7 ~ 0.9 nm,说明微孔在0.3 ~ 0.9 nm之间广泛分布。

### 3.4 孔隙分形特征

通过扫描电镜图像可以清晰地观察到页岩储层发育大量微纳米尺度的孔隙,孔径差异较大,且形态各异。分形维数能够揭示页岩孔隙结构复杂程度,并对页岩孔隙结构进行精细表征<sup>[40-46]</sup>。利用低温N<sub>2</sub>吸附实验结果制作lnV与ln ln(P<sub>0</sub>/P)关系曲

线(图7)。由于低温N<sub>2</sub>吸附曲线与脱附曲线在P/P<sub>0</sub>为0.45 ~ 0.5时明显未重合,产生了滞后现象,反映在该相对压力前后孔隙结构差异明显。根据图7双对数曲线的特点,以P/P<sub>0</sub>=0.45为分界线,对分界线左、右吸附曲线进行线性拟合,拟合出不同压力段曲线的斜率,基于(2)式计算分形维数。结果显示,页岩孔隙具有双重分形特征,且两者之间具有较高的相关性。0 < P/P<sub>0</sub> < 0.45为相对压力较低段,其分形维数为D<sub>1</sub>; P/P<sub>0</sub> > 0.45为相对压力高段,分形维数为D<sub>2</sub>。下乌尔禾组页岩孔隙分形维数(表3)显示, D为2.452 2 ~ 2.774 8,分形维数较高,孔隙复杂程度较高。其中, D<sub>1</sub>与D<sub>2</sub>相差较大, D<sub>1</sub>为2.452 2 ~ 2.594 8,平均为2.540 9; D<sub>2</sub>为2.604 5 ~ 2.774 8,平均为2.705 6; D<sub>1</sub>与D<sub>2</sub>均远离2而接近于3,表明下乌尔禾组页岩孔隙结构复杂,非均质性强。

## 4 讨论

### 4.1 孔隙结构与TOC及矿物组分的关系

通过孔隙结构参数与TOC的相关性分析可以看出, TOC与孔隙比表面积和孔体积呈负相关性(图8),表明页岩中有机质对比表面积和孔体积贡献很小,甚至可能造成孔隙空间的堵塞,也表明以III型干酪根为主的下乌尔禾组页岩有机孔不发育,扫描电镜观察到极少部分有机孔(图2b, 2c);有机孔并非主要孔隙,无机孔是下乌尔禾组页岩孔体积的主要贡献者<sup>[47]</sup>。由于下乌尔禾组页岩埋深极大,强烈的压实作用会导致有机孔被破坏,造成有机孔数量减少。

页岩矿物的组成是岩石空间结构的最基本要素,在成岩演化过程中,不同的矿物组分对页岩孔

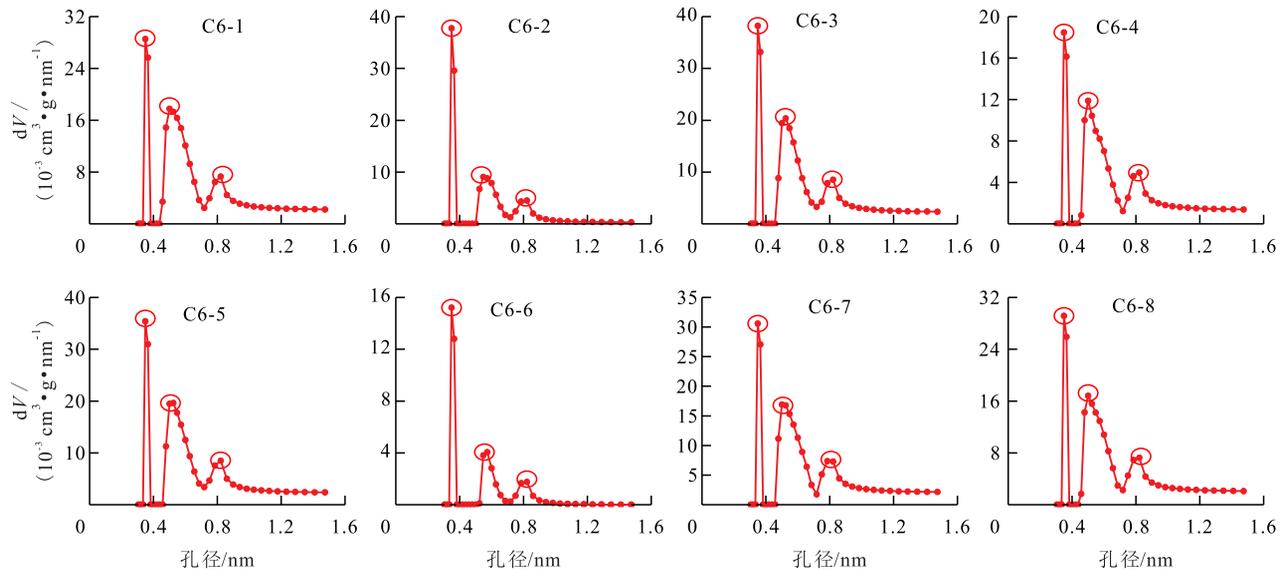


图6 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩基于低压CO<sub>2</sub>吸附实验的微孔孔径分布曲线  
Fig.6 Pore size distribution curves of shale samples from Lower Wuerhe Formation in central Junggar Basin based on low-pressure CO<sub>2</sub> adsorption

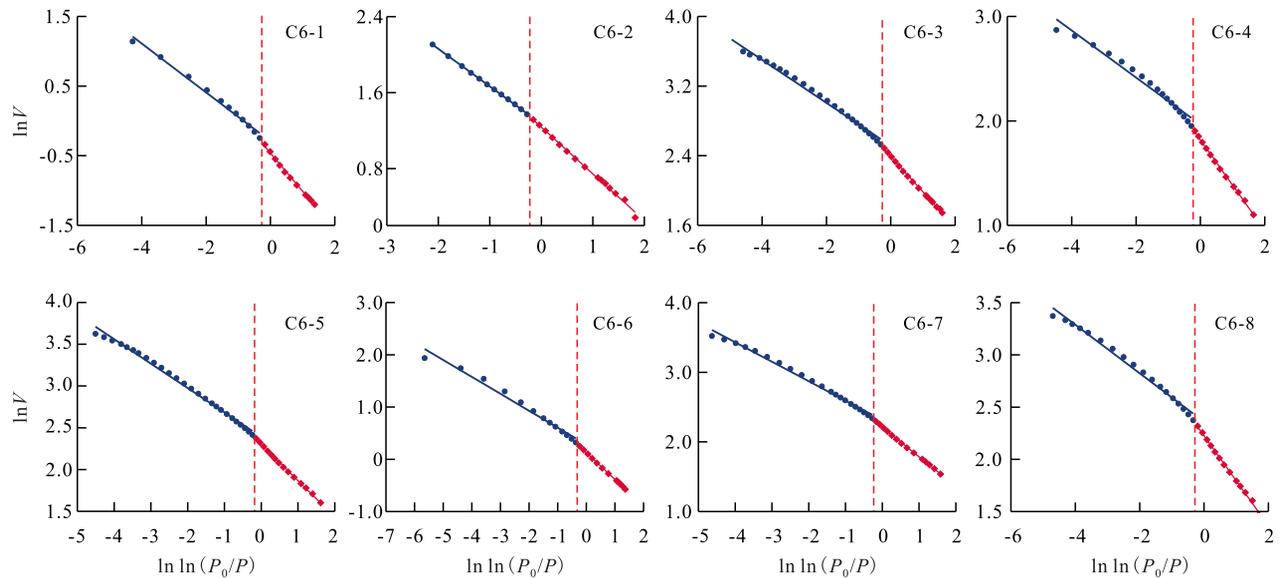


图7 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩分形拟合曲线  
Fig.7 Fractal fitting curve of shale samples from Lower Wuerhe Formation in central Junggar Basin

表3 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩孔隙分形维数  
Table3 Fractal dimension of shale pores of Lower Wuerhe Formation in central Junggar Basin

样品编号	$P/P_0 < 0.45$			$P/P_0 > 0.45$		
	分形拟合方程	$R^2$	$D_1$	分形拟合方程	$R^2$	$D_2$
C6-1	$y = -0.5478x - 0.4625$	0.996	2.4522	$y = -0.3511x - 0.2928$	0.990	2.6489
C6-2	$y = -0.4909x + 1.2360$	0.995	2.5091	$y = -0.3955x + 1.2702$	0.999	2.6045
C6-3	$y = -0.4052x + 2.3893$	0.998	2.5948	$y = -0.2535x + 2.5036$	0.992	2.7465
C6-4	$y = -0.4322x + 1.8168$	0.998	2.5678	$y = -0.2552x + 1.9650$	0.972	2.7748
C6-5	$y = -0.4314x + 2.2980$	0.998	2.5686	$y = -0.2925x + 2.3903$	0.994	2.7075
C6-6	$y = -0.5086x + 0.1245$	0.999	2.4914	$y = -0.3239x + 0.2806$	0.978	2.6761
C6-7	$y = -0.4255x + 2.2113$	0.998	2.5745	$y = -0.2794x + 2.3129$	0.992	2.7206
C6-8	$y = -0.4311x + 2.2258$	0.997	2.5689	$y = -0.2321x + 2.3598$	0.988	2.7679

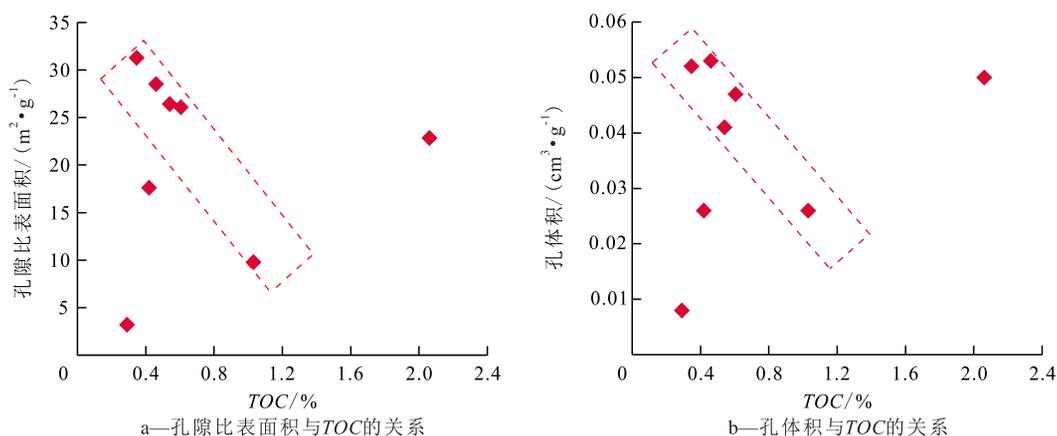


图8 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩孔隙结构参数与TOC的关系

Fig.8 Relationship between pore structure parameters and TOC of Lower Wuerhe Formation shale in central Junggar Basin

隙发育的影响程度也不相同<sup>[40]</sup>。下乌尔禾组页岩矿物组成以石英、长石和黏土矿物为主,故重点研究这3种矿物含量对孔隙结构参数的影响。研究区页岩石英含量与孔体积表现出较强的正相关关系(图9a),相关系数为0.56,表明埋藏成岩作用过程中,石英作为刚性颗粒自身塑性形变程度低,对孔隙具有一定的支撑作用,尤其是原生矿物粒间孔,进而减小压实作用对页岩孔隙造成的影响。长石含量与页岩孔体积呈较强的正相关关系(图9b),孔体积随长石含量的增加而增加,相关系数为0.49,表明在长石矿物内部也发育一定的孔隙<sup>[42]</sup>。黏土矿物含量与孔体积呈正相关关系(图9c),孔体积随黏土矿物含量的增大而增大,相关系数为0.67,反映出黏土矿物的增加有助于微孔的发育<sup>[35]</sup>,微孔数量增加使得页岩孔体积增大。

#### 4.2 孔隙结构参数与分形维数的关系

分形维数可以定量表征页岩孔隙结构的复杂程度,同时表征页岩对气体的吸附能力,一般而言,页岩吸附能力随分形维数的增大而增大<sup>[9-10]</sup>。前人研究表明,孔体积控制游离气含量,比表面积与吸

附气量相关;孔体积的贡献者主要来自于微孔和介孔;微孔对比表面积的贡献最大,主要是因为页岩中微孔数量众多,较为发育且结构复杂;孔隙结构越复杂,页岩孔隙比表面积越大<sup>[10-12,15-17]</sup>。下乌尔禾组页岩孔隙结构参数与分形维数的关系(图10)表明,分形维数与孔体积及孔隙比表面积皆呈正相关关系,但分形维数与孔隙比表面积的相关性要强于与孔体积的相关性,其中,孔隙比表面积与 $D_1$ 及 $D_2$ 的相关系数分别为0.37和0.32(图10a);孔体积与 $D_1$ 及 $D_2$ 呈微弱的正相关(图10b)。通过分析孔隙结构参数(孔体积和比表面积)与分形维数的关系可知,分形维数随孔体积和比表面积的增加而增大,表明页岩微孔、介孔越发育,孔体积和比表面积越大,页岩孔隙结构越复杂,非均质性越强。

#### 4.3 分形维数的影响因素

探讨分形维数的影响因素,将有助于更深入地认识页岩非均质性的影响因素及形成机理<sup>[24-26]</sup>。不同的页岩矿物组分含量对孔隙的非均质性影响也不相同<sup>[40-42]</sup>。TOC与 $D_1$ 呈明显负相关,与 $D_2$ 无明显相关性(图11a)。一般而言,比表面积随有机孔的

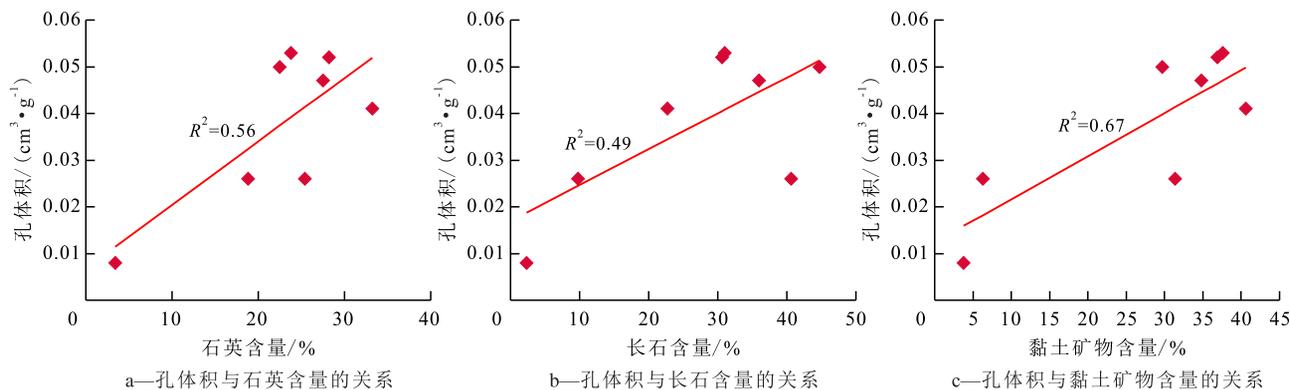
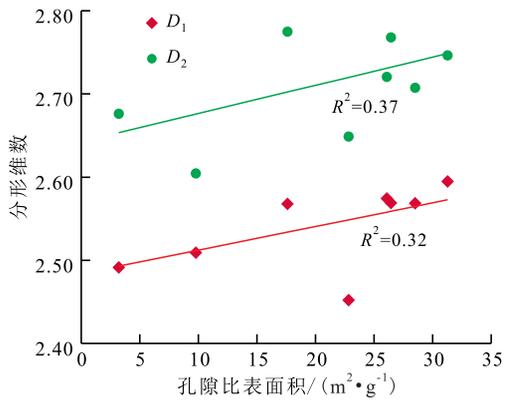
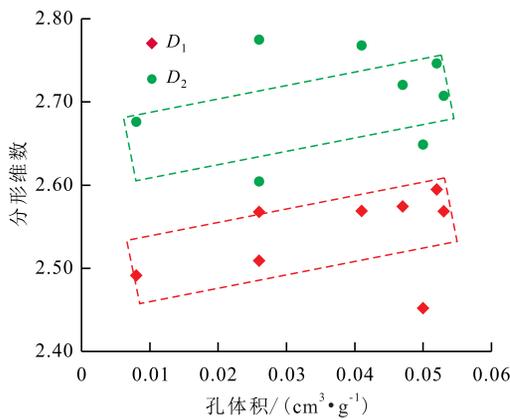


图9 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩矿物组分与孔隙结构参数的关系

Fig.9 Relationship between mineral composition and pore structure parameters of shale samples from Lower Wuerhe Formation, central Junggar Basin



a—孔隙比表面积与分形维数的关系



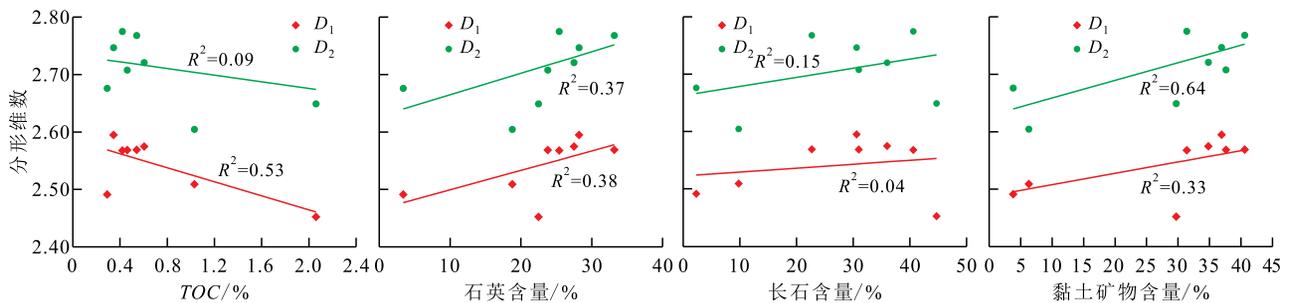
b—孔体积与分形维数的关系

图10 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩孔隙结构参数与分形维数的关系

Fig.10 Relationship between pore structure parameters and fractal dimension of Lower Wuerhe Formation shale in central Junggar Basin

发育而增大,孔隙结构越复杂,下乌尔禾组页岩有机质含量较少,导致有机孔不发育;此外,页岩埋深超6 000 m,在强压实作用下,有机孔会发生坍塌现象<sup>[43]</sup>,使得TOC与分形维数呈负相关。

石英含量有助于原生粒间孔的保存,页岩分形维数与石英含量表现出较弱的正相关关系(图11b)。由于石英具有较强的抗压实性,有利于页岩成岩作用过程中原生粒间孔的保存,在强烈的脆性



a—分形维数与TOC的关系

b—分形维数与石英含量的关系

c—分形维数与长石含量的关系

d—分形维数与黏土矿物含量的关系

图11 准噶尔盆地中部下乌尔禾组页岩TOC和矿物组分与分形维数的关系

Fig.11 Relationship among TOC, mineral components, and fractal dimension of shale samples from Lower Wuerhe Formation in central Junggar Basin

及挤压作用下,会形成微裂缝;与黏土矿物层间缝相比,微裂缝类型多样,结构更为复杂。分形维数随长石含量的增加逐渐增大(图11c),表明页岩孔隙结构复杂程度随长石含量的增加而变得更复杂,推测与长石溶蚀孔隙晚期大量形成相关。黏土矿物含量与D₁及D₂表现出较强的正相关关系(图11d),相关系数分别为0.64和0.33。随着黏土矿物含量的增加,页岩内部发育大量的纳米尺度孔隙,导致分形维数增加。一般而言,页岩孔隙空间和比表面积越大,孔隙非均质性越强,结构越复杂。

## 5 结论

(1)准噶尔盆地中部东道海子凹陷下乌尔禾组陆相页岩具有石英含量低、长石和黏土矿物含量高的特点。TOC值为0.29%~2.06%,平均为0.72%;R<sub>0</sub>值为1.30%~1.55%,处于大量生烃阶段。基于FHH模型计算页岩孔隙分形维数D₁为2.452 2~2.594 8,平均为2.540 9;D₂为2.604 5~2.774 8,平均为2.705 6;表明下乌尔禾组页岩孔隙复杂性和非均质性较强。

(2)下乌尔禾组页岩主要发育无机孔(粒内孔和粒间孔)和微裂缝,有机孔不发育;页岩孔隙形态以平行板状或窄缝状为主,孔径分布呈多峰型。下乌尔禾组页岩孔隙发育受TOC、石英、长石以及黏土矿物含量的控制。孔隙结构参数(孔体积和比表面积)与TOC呈负相关,与石英、长石以及黏土矿物含量呈正相关。

(3)分形维数与孔体积及比表面积、矿物组分呈正相关,与TOC呈负相关,石英与黏土矿物含量的增加,导致页岩内部发育大量小尺度孔隙以及微裂缝,其比表面积和孔体积也越大,分形维数越大,孔隙结构越复杂,非均质性越强。

## 符号解释

- $A$  ——  $\ln V$ 与 $\ln \ln(P_0/P)$ 双对数曲线的斜率;  
 $C$  —— 常数;  
 $D$  —— 分形维数,结合拟合曲线斜率可以求得;  
 $P$  —— 平衡时的压力,MPa;  
 $P_0$  —— 气体饱和蒸汽压,MPa;  
 $V$  —— 不同相对压力条件下的气体吸附量, $\text{cm}^3/\text{g}$ 。

## 参考文献

- [1] 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14.  
 ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [2] 杨勇.济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律[J].油气地质与采收率,2023,30(1):1-20.  
 YANG Yong. Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1): 1-20.
- [3] 张君峰,周志,宋腾,等.中美页岩气勘探开发历程、地质特征和开发利用条件对比及启示[J].石油学报,2022,43(12):1 687-1 701.  
 ZHANG Junfeng, ZHOU Zhi, SONG Teng, et al. Comparison of exploration and development history, geological characteristics and exploitation conditions of shale gas in China and the United States and its enlightenment [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1 687-1 701.
- [4] 张金川,史森,王东升,等.中国页岩气勘探领域和发展方向[J].天然气工业,2021,41(8):69-80.  
 ZHANG Jinchuan, SHI Miao, WANG Dongsheng, et al. Fields and directions for shale gas exploration in China [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 69-80.
- [5] 谷渊涛,李晓霞,万泉,等.泥页岩有机质孔隙差异特征及影响因素分析——以我国典型海相、陆相、过渡相储层为例[J].沉积学报,2021,39(4):794-810.  
 GU Yuantao, LI Xiaoxia, WAN Quan, et al. On the different characteristics of organic pores in shale and their influencing factors: Taking typical marine, continental, and transitional facies reservoirs in China as examples [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(4): 794-810.
- [6] 邹才能,赵群,董大忠,等.页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J].天然气地球科学,2017,28(12):1 781-1 796.  
 ZOU Caineng, ZHAO Qun, DONG Dazhong, et al. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(12): 1 781-1 796.
- [7] 赵越,李磊,司运航,等.浅层页岩气储层孔隙分形特征及控制因素——以云南昭通地区龙马溪组为例[J].吉林大学学报:地球科学版,2022,52(6):1 813-1 829.  
 ZHAO Yue, LI Lei, SI Yunhang, et al. Fractal characteristics and controlling factors of pores in shallow shale gas reservoirs: A case study of Longmaxi Formation in Zhaotong Area, Yunnan Province [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2022, 52(6): 1 813-1 829.
- [8] 聂万才,张廷山,王铭伟,等.海陆过渡相煤系页岩孔隙分形特征及影响因素——以沁水盆地北部太原组为例[J/OL].沉积学报,https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.078.  
 NIE Wancai, ZHANG Tingshan, WANG Mingwei, et al. Fractal characteristics and interfering Factors of microscopic pores in marine-continental transitional coal shale: A case study of the Taiyuan formation in the northern Qinshui Basin [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica, https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.078.
- [9] 刘若冰,魏志红,加奥启,等.川东南地区五峰-龙马溪组深层超压富有机质页岩孔隙结构分形特征及其地质意义[J].地球科学,2023,48(4):1 496-1 516.  
 LIU Ruobing, WEI Zhihong, JIA Aoqi, et al. Fractal characteristics of pore structure in deep overpressured organic-rich shales in Wufeng-Longmaxi Formation in southeastern Sichuan and its geological significance [J]. Earth Science, 2023, 48(4): 1 496-1 516.
- [10] SHAN Changan, ZHAO Weiwei, WANG Fengqin, et al. Nanoscale pore structure heterogeneity and its quantitative characterization in Chang7 lacustrine shale of the southeastern Ordos Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 187: 106754.
- [11] WANG Guanping, ZHANG Qian, ZHU Rukai, et al. Geological controls on the pore system of lacustrine unconventional shale reservoirs: The Triassic Chang 7 member in the Ordos Basin, China [J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 221: 111139.
- [12] LI Xiaoming, WANG Yarong, LIN Wen, et al. Micro-pore structure and fractal characteristics of deep shale from Wufeng Formation to Longmaxi Formation in Jingmen exploration area, Hubei Province, China [J]. Journal of Natural Gas Geoscience, 2022, 7(3): 121-132.
- [13] LI Yang, ZHOU Dehua, WANG Weihong, et al. Development of unconventional gas and technologies adopted in China [J]. Energy Geoscience, 2020, 1(1): 55-68.
- [14] 梁志凯,李卓,姜振学,等.基于NMR和SEM技术研究陆相页岩孔隙结构与分形维数特征——以松辽盆地长岭断陷沙河子组页岩为例[J].地球科学与环境学报,2020,42(3):313-328.  
 LIANG Zhikai, LI Zhuo, JIANG Zhenxue, et al. Characteristics of pore structure and fractal dimension in continental shale based on nmr experiments and sem image analyses-a case study of Shahezi Formation Shale in Changling Fault Depression of Songliao Basin, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(3): 313-328.
- [15] 孙寅森,郭少斌.基于图像分析技术的页岩微观孔隙特征定性及定量表征[J].地球科学进展,2016,31(7):751-763.  
 SUN Yinsen, GUO Shaobin. Qualitative and quantitative characterization of shale microscopic pore characteristics based on image analysis technology [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(7): 751-763.

- [16] XIE Xinhui, DENG Hucheng, FU Meiyang, et al. Evaluation of pore structure characteristics of four types of continental shales with the aid of low-pressure nitrogen adsorption and an improved FE-SEM technique in Ordos Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 197: 108018.
- [17] ZHANG Jizhen, TANG Youjun, HE Daxiang, et al. Full-scale nanopore system and fractal characteristics of clay-rich lacustrine shale combining FE-SEM, nano-CT, gas adsorption and mercury intrusion porosimetry [J]. *Applied Clay Science*, 2020, 196: 105758.
- [18] 孙雅雄, 张坦, 丁文龙, 等. 压汞法与数字图像分析技术在致密砂岩储层微观孔隙定量分析中的应用——以鄂尔多斯盆地吴起油田X区块为例[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(6): 1105-1115.
- SUN Yaxiong, ZHANG Tan, DING Wenlong, et al. Application of mercury intrusion method and digital image analysis in quantitative analysis of micro-scale pores in tight sandstone reservoirs: a case study of X block in Wuqi Oil Field, Ordos Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(6): 1105-1115.
- [19] MA Xiao, GUO Shaobin, SHI Dishu, et al. Investigation of pore structure and fractal characteristics of marine-continental transitional shales from Longtan Formation using MICP, gas adsorption, and NMR (Guizhou, China) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 107: 555-571.
- [20] 吴伟, 梁志凯, 郑马嘉, 等. 页岩储层孔隙结构与分形特征演化规律[J]. *油气地质与采收率*, 2022, 29(4): 35-45.
- WU Wei, LIANG Zhikai, ZHENG Majia, et al. Pore structures in shale reservoirs and evolution laws of fractal characteristics [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2022, 29(4): 35-45.
- [21] 邹俊超, 杨政, 蓝贵港, 等. 基于压汞、低温液氮、X射线小角散射的低阶煤储层孔隙分形特征对比[J]. *中国煤炭地质*, 2021, 33(10): 22-30.
- ZOU Junchao, YANG Zheng, LAN Guigang, et al. Contrast of low ranked coal reservoir pore fractal features based on mercury intrusion, cryogenic liquid nitrogen, X-ray small angle scattering methods [J]. *Coal Geology of China*, 2021, 33(10): 22-30.
- [22] 余旭东, 康志宏, 周磊, 等. 核磁共振技术在页岩孔隙表征中的应用[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(5): 129-131.
- YU Xudong, KANG Zhihong, ZHOU Lei, et al. Application of nuclear magnetic resonance in shale pore characterization [J]. *Coal Technology*, 2018, 37(5): 129-131.
- [23] 何强, 李凤霞, 史爱萍, 等. 基于三维CT重构的油页岩复杂水力裂缝网络分形表征[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(5): 116-123.
- HE Qiang, LI Fengxia, SHI Aiping, et al. Fractal characterization of complex hydraulic fracture networks of oil shale via 3D CT reconstruction [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(5): 116-123.
- [24] SUN Mengdi, ZHANG Linhao, HU Qinrong, et al. Multiscale connectivity characterization of marine shales in southern China by fluid intrusion, small-angle neutron scattering (SANS), and FIB-SEM [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 112: 104101.
- [25] CHANDRA Debanjan, VISHAL Vikram, BAHADUR Jitendra, et al. A novel approach to identify accessible and inaccessible pores in gas shales using combined low-pressure sorption and SAXS/SANS analysis [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2020, 228: 103556.
- [26] HE Houfeng, LIU Pengcheng, XU Liang, et al. Pore structure representations based on nitrogen adsorption experiments and an FHH fractal model: Case study of the block Z shales in the Ordos Basin, China [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2021, 203: 108661-1-108661-12.
- [27] ZHOU Zengyuan, LI Yong, LU Jungang, et al. Origin and genesis of the permian hydrocarbon in the northeast of the Dongdaohaizi Depression, Junggar Basin, China [J]. *ACS Omega*, 2022, 7(28): 24157-24173.
- [28] 曹江骏, 罗静兰, 马迪娜 马吾提汗, 等. 差异性沉积—成岩演化过程对砂砾岩储层致密化的影响——以准噶尔盆地东部二叠系上乌尔禾组为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(5): 923-940.
- CAO Jiangjun, LUO Jinglan, MADINA Mawutihan, et al. Influence of differential sedimentary-diagenetic evolution on the densification of the sandy conglomerate reservoir: A case study of the Permian Upper Wuerhe formation in eastern Junggar Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2022, 51(5): 923-940.
- [29] 李博德, 李美俊, 唐友军, 等. 烃源岩生物标志化合物分布特征及其地质意义——以准噶尔盆地中部地区中二叠统下乌尔禾组为例[J]. *东北石油大学学报*, 2022, 46(5): 68-82, 105.
- LI Bocai, LI Meijun, TANG Youjun, et al. Distribution characteristics and geological significance of biomarkers in source rocks of Lower Wuerhe Formation of Middle Permian in central Junggar Basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022, 46(5): 68-82, 105.
- [30] 李艳平, 邹红亮, 李雷, 等. 准噶尔盆地东道海子凹陷上乌尔禾组油气勘探思路及发现[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(2): 127-134.
- LI Yanping, ZOU Hongliang, LI Lei, et al. Petroleum exploration Ideas and discoveries in Upper Wuerhe Formation, Dongdaohaizi Sag, Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(2): 127-134.
- [31] 唐勇, 王智强, 庞燕青, 等. 准噶尔盆地西部坳陷二叠系下乌尔禾组烃源岩生烃潜力评价[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(4): 16-28.
- TANG Yong, WANG Zhiqiang, PANG Yanqing, et al. Hydrocarbon-generating potential of source rocks of Permian lower Urho Formation in western depression, Junggar Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(4): 16-28.
- [32] 徐冠军, 高瑛, 董淑红, 等. 沉积岩中总有机碳的测定标准: GB/T 19145—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- XU Guanjun, GAO Ying, DONG Shuhong, et al. Determination of total organic carbon in sedimentary rock: GB/T 19145-2003 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.

- [33] 涂建琪,黎萍,邱平,等.沉积岩中镜质体反射率测定方法:SY/T 5124—2012[S].北京:石油工业出版社,2012.  
TU Jianqi, LI Ping, QIU Ping, et al. Method of determining microscopically the reflectance of vitrinite in sedimentary: SY/T 5124-2012 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [34] 曾理,万茂霞,李晓红,等.沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物X射线衍射分析方法:SY/T 5163—2018[S].北京:石油工业出版社,2018.  
ZENG Li, WAN Maoxia, LI Xiaohong. Analysis method for clay minerals and ordinary non-clay minerals in sedimentary rocks by the X-ray diffraction: SY/T 5163-2018 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [35] SING K S W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984) [J]. Pure and Applied Chemistry, 1985, 57(4): 603-619.
- [36] 张大智.利用氮气吸附实验分析致密砂岩储层微观孔隙结构特征——以松辽盆地徐家围子断陷沙河子组为例[J].天然气地球科学,2017,28(6):898-908.  
ZHANG Dazhi. Characterization of microscopic pore structure of tight sandstone reservoirs through nitrogen adsorption experiment: Case study of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(6): 898-908.
- [37] 杨超,熊永强,张金川.中国不同沉积类型页岩生烃有机孔发育差异[J].地球化学,2019,48(6):544-554.  
YANG Chao, XIONG Yongqiang, ZHANG Jinchuan. Developmental differences of secondary organic pores among marine, lacustrine, and transitional shale in China [J]. Geochimica, 2019, 48(6): 544-554.
- [38] 刘世明,唐书恒,霍婷,等.柴达木盆地东缘上石炭统泥页岩孔隙结构及分形特征[J].天然气地球科学,2020,31(8):1 069-1 081.  
LIU Shiming, TANG Shuheng, HUO Ting, et al. Pore structure and fractal characteristics of the Upper Carboniferous shale, eastern Qaidam Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(8): 1 069-1 081.
- [39] 聂海宽,张光荣,李沛,等.页岩有机孔研究现状和展望[J].石油学报,2022,43(12):1 770-1 787.  
NIE Haikuan, ZHANG Guangrong, LI Pei, et al. Research status and prospect on organic matter pores in shale [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1 770-1 787.
- [40] 黄开展,刘薇.南川地区龙马溪组海相页岩孔隙特征精细描述及分形特征分析——以胜页1井为例[J].中国海上油气,2022,34(5):64-71.  
HUANG Kaizhan, LIU Wei. Pore structure and fractal characteristics of marine shale in Longmaxi Formation, Nanchuan area: A case study of Well SY-1 [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(5): 64-71.
- [41] 孙寅森.鄂尔多斯盆地东部山西组页岩孔隙表征及控制因素[D].北京:中国地质大学(北京),2019.  
SUN Yinsen. Pore characterization and control factors of Shanxi Shale in Eastern Ordos Basin [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [42] 曾维主.松辽盆地青山口组页岩孔隙结构与页岩油潜力研究[D].广州:中国科学院广州地球化学研究所,2020.  
ZENG Weizhu. Pore structure and shale oil potential of Qing-shankou Formation shale in Songliao Basin [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [43] 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.
- [44] 孙中良,王芙蓉,韩元佳,等.潜江凹陷盐间页岩油储层孔隙结构分形表征与评价[J].地质科技通报,2022,41(4):125-137.  
SUN Zhongliang, WANG Furong, HAN Yuanjia, et al. Characterization and evaluation of fractal dimension of intersalt shale oil reservoirs in Qianjiang Depression [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(4): 125-137.
- [45] 石玉江,蔡文渊,刘国强,等.页岩油储层孔隙流体的全直径岩心二维核磁共振谱特征及评价方法[J].中国石油勘探,2023,28(3):132-144.  
SHI Yujiang, CAI Wenyuan, LIU Guoqiang, et al. Full diameter core 2D NMR characteristics of pore fluid in shale oil reservoir and evaluation method [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 132-144.
- [46] 孙建博,石彬,郭超,等.鄂尔多斯盆地富县地区三叠系延长组长<sub>7</sub>亚段页岩油储层特征与勘探前景[J].中国石油勘探,2023,28(4):79-91.  
SUN Jianbo, SHI Bin, GUO Chao, et al. Characteristics of shale oil reservoir and exploration prospects in the third sub-member of the seventh member of the Triassic Yanchang Formation in Fuxian area, Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 79-91.
- [47] YANG Yuanyuan, ZHANG Jinchuan, XU Longfei, et al. Pore structure and fractal characteristics of deep shale: A case study from Permian Shanxi Formation shale, from the Ordos Basin [J]. ACS Omega, 2022, 7(11): 9 229-9 243.

编辑 经雅丽