

引用格式:朱根根,赵妍菲,胡海燕,等.准噶尔盆地二叠系风二段凝灰岩储层孔隙多重分形特征[J].油气地质与采收率,2024,31(2):17-28.

ZHU Gengen, ZHAO Yanfei, HU Haiyan, et al. Multifractal characteristics of pores in tuff reservoirs in Feng-second member of Permian in Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(2): 17-28.

## 准噶尔盆地二叠系风二段凝灰岩储层 孔隙多重分形特征

朱根根<sup>1</sup>,赵妍菲<sup>2</sup>,胡海燕<sup>1</sup>,王大兴<sup>1</sup>

(1.长江大学 资源与环境学院,湖北 武汉 430100; 2.桂林理工大学 地球科学学院,广西 桂林 541004)

**摘要:**凝灰岩储层作为致密油气储层的一种,其微纳米孔隙对油气的储存有着较大的影响。为明确准噶尔盆地哈山地区二叠系风二段凝灰岩储层孔隙结构及非均质性特征,选取哈山地区哈11井6块凝灰岩样品,采用总有机碳含量测定、全岩矿物组分析,通过CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>吸附实验对凝灰岩储层孔隙结构进行表征,结合多重分形理论,分析孔隙的非均质性及连通性。结果表明:所选凝灰岩样品TOC平均为0.931%,矿物组分以长石、石英、黏土矿物以及白云石为主。微孔主要发育0.33~0.38,0.50~0.68及0.72~0.86 nm<sup>3</sup>个孔径区间内的孔隙,介-宏孔主要发育2.94~16.09 nm孔径区间内的孔隙。广义分形维数( $D_q$ )随着 $q$ 的增大而减小,奇异分形谱呈凸起的非对称抛物线状,凝灰岩储层孔隙具有多重分形特征。微孔(0~2 nm)具有较小的奇异谱谱宽( $\Delta\alpha$ )和较大的Hurst指数( $H$ ),而介-宏孔(2~100 nm)具有较大的 $\Delta\alpha$ 值和较小的 $H$ 值,表明微孔具有较好的均质性和连通性。介-宏孔的非均质性受孔体积的影响,随着孔体积的增大,孔隙非均质性增强,连通性降低。TOC和矿物组分对孔隙非均质性含量和连通性均有不同程度的影响,TOC的增加提高了介-宏孔的连通性,斜长石含量的增加提高了介-宏孔的非均质性,黏土矿物含量的增加提高了微孔的非均质性,白云石和方解石含量的增加降低了介-宏孔的非均质性。

**关键词:**多重分形;非均质性;气体吸附实验;凝灰岩;风城组;准噶尔盆地

文章编号:1009-9603(2024)02-0017-12

DOI:10.13673/j.pgre.202307030

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## Multifractal characteristics of pores in tuff reservoirs in Feng-second member of Permian in Junggar Basin

ZHU Gengen<sup>1</sup>, ZHAO Yanfei<sup>2</sup>, HU Haiyan<sup>1</sup>, WANG Daxing<sup>1</sup>

(1.Faculty of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan City, Hubei Province, 430100, China; 2.Faculty of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin City, Guangxi Province, 541004, China)

**Abstract:** Tuff reservoirs, as a type of tight oil and gas reservoir, are significantly influenced by their micro and nano-pores in terms of hydrocarbon storage. To understand the pore structure and heterogeneity characteristics of tuff reservoirs in the Permian Section 2 Feng in Hashan area, Junggar Basin, six tuff samples from Well Ha 11 in Hashan area were selected. These samples underwent total organic carbon (TOC) content measurement, whole rock mineral composition analysis, and characterization of pore structure through CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> adsorption experiments. Using multifractal theory, the pore heterogeneity and connectivity were analyzed. The results show that the average TOC content of the tuff samples is 0.931%, and the mineral compo-

收稿日期:2023-07-31。

作者简介:朱根根(1997—),男,河南商丘人,在读硕士研究生,从事储层发育机理与表征、赋存状态与富集规律研究。E-mail:zhugengen163@163.com。

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:中国石化科技重大攻关课题子课题“复杂叠合盆地矿权战略选取综合评价方法研究”(P17001-7)。

nents are mainly feldspar, quartz, clay minerals, and dolomite. Micropores are mainly developed in the 0.33-0.38, 0.50-0.68, and 0.72-0.86 nm pore size ranges, while meso-macropores are mainly developed in the 2.94-16.09 nm range. The generalized fractal dimension  $D_q$  decreases with increasing  $q$ , and the singular fractal spectrum shows a convex asymmetric parabola. The pores in tuff reservoirs have multifractal characteristics. Micropores (0-2 nm) have smaller width of the singular spectrum ( $\Delta\alpha$ ) values and larger Hurst index ( $H$ ) values, while meso-macropores (2-100 nm) have larger  $\Delta\alpha$  values and smaller Hurst index ( $H$ ) values, indicating that micropores have better homogeneity and connectivity. The heterogeneity of meso-macropores is affected by the pore volume. With the increase in pore volume, pore heterogeneity increases, and connectivity decreases. TOC content and mineral composition have different effects on pore heterogeneity and connectivity. An increase in TOC content improves the connectivity of meso-macropores. An increase in plagioclase content increases the heterogeneity of meso-macropores. An increase in clay mineral content increases the heterogeneity of micropores, while an increase in dolomite and calcite content reduces the heterogeneity of meso-macropores.

**Key words:** multifractal; heterogeneity; gas adsorption experiment; tuff; Fengcheng Formation; Junggar Basin

随着全球非常规油气资源的不断发展,非常规油气在油气资源中的地位也越来越高。凝灰岩储层作为致密油气储层的一种,其与泥页岩一样也发育有一定的微纳米孔隙<sup>[1-2]</sup>,为页岩油提供了赋存空间,因此通过对凝灰岩储层中微纳米孔隙分布、形态、结构、连通性及非均质性的研究,为页岩油的开发提供理论依据。

目前对凝灰岩储层中微纳米孔隙的表征方法主要包括流体注入法、图像分析法以及非流体注入法3种类型。流体注入法主要包括气体吸附法、压汞法(MIP)等实验方法,该方法将实验所获取的数据通过理论模型计算得到孔体积、比表面积以及孔径分布等孔隙结构信息<sup>[3-4]</sup>;图像分析法主要采用场发射扫描电镜(FE-SEM)、原子力显微镜(AFM)以及微纳米CT等技术<sup>[5]</sup>,可通过图像直观地观察孔隙类型、形态及分布等孔隙结构特征;非流体注入法采用核磁共振(NMR)、小角散射(SANS)以及超小角散射(USANS)等技术,该方法能够对岩石样品孔隙进行无损表征,精度较高<sup>[6]</sup>。以上方法均可获取孔体积、比表面积、孔径分布、孔隙类型等相关参数,但无法获取孔隙网络的复杂程度与连通性的相关参数。

凝灰岩储层的孔隙非均质性与连通性表征对页岩油的赋存与流动有着重要意义<sup>[7]</sup>。前人使用单分形维数对孔隙非均质性及孔隙表面粗糙程度进行表征,常见的分形模型有FHH模型、D-R模型、V-S模型、热力学模型等<sup>[7-11]</sup>。然而,单分形维数只能描述有限区间范围内的孔径分布非均质性,在非均质岩石中,孔径分布具有一定的随机波动性<sup>[12]</sup>,使得单分形维数难以精确描述孔径分布非均质性,存在局限性。多重分形作为单分的叠加与延伸,能够表征多孔介质不同尺度孔径区间内的分形特征,获

取复杂多孔介质更为详细的分形信息<sup>[13-15]</sup>,一般以奇异谱和广义维数谱的形式表征多孔介质孔径分布的非均质性与连通性。多重分形在储层孔隙特征研究方面也得到了应用,包括页岩、煤、碳酸盐岩,WANG等利用扫描电镜图像基于多重分形理论,分析了四川盆地龙马溪组页岩孔隙多重分形特征<sup>[16]</sup>;ZHAO等利用核磁共振技术基于多重分形理论,分析了准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组致密油气储层孔隙的多重分形特征<sup>[17]</sup>。近年来,随着非常规油气勘探力度的增大,准噶尔盆地哈山地区二叠系风城组页岩油引起了广泛关注,诸多学者对其展开了储层特征<sup>[18]</sup>、页岩油富集模式<sup>[19]</sup>、沉积特征<sup>[20]</sup>等研究,然而风城组凝灰岩储层微纳米孔隙的非均质性并没有得到很好的研究。

笔者基于气体吸附实验,运用多重分形理论对凝灰岩孔径分布的非均质性与连通性进行研究,揭示有机质含量、矿物组分等对岩石孔隙非均质性 & 连通性的影响,为页岩油的开发提供理论依据。

## 1 区域地质概况

哈山地区位于准噶尔盆地西北缘,南邻玛湖凹陷,西邻扎伊尔山,北邻和什托洛盖盆地(图1)。哈山地区二叠系自下而上依次发育佳木河组、风城组、夏子街组以及下乌尔禾组。风城组自下而上可分为风一段、风二段以及风三段,其中风一段发育白云质泥岩、泥质白云岩以及白云质粉砂岩,由于火山活动,局部发育火山碎屑岩;风二段发育泥质白云岩、凝灰质白云岩以及白云质凝灰岩,该段白云岩较发育;风三段主要发育砾岩、含砾砂岩等粗粒碎屑岩,局部发育泥质白云岩及火山碎屑岩<sup>[18,21]</sup>。

实验样品取自哈山地区哈11井二叠系风二段



概率质量函数与盒子长度之间存在指数函数关系,因此, $p_i(\varepsilon)$ 也可以表示为:

$$p_i(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-\alpha_i} \quad (3)$$

$\alpha_i$ 用于表示 $p_i(\varepsilon)$ 的局部奇异性程度<sup>[27]</sup>,其依赖于盒子长度。 $\alpha_i$ 值越小,数据的变化程度或异质性越高; $\alpha_i$ 值越大,数据的规则性或统一性越高。对于具有多重分形性质的区间,定义具有相同概率质量值的盒子个数为 $N_\alpha(\varepsilon)$ ,其随着 $\varepsilon$ 值的减小而增大,二者存在幂函数曲线关系,表达式为:

$$N_\alpha(\varepsilon) \sim \varepsilon^{-f(\alpha)} \quad (4)$$

(4)式中, $\varepsilon$ 值趋向于0。 $\alpha(q)$ 和 $f(\alpha)$ 的计算公式分别为<sup>[25]</sup>:

$$\alpha(q) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} [u_i(q, \varepsilon) \lg \varepsilon]}{\lg \varepsilon} \quad (5)$$

$$f(\alpha) \propto \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} [u_i(q, \varepsilon) \lg u_i(q, \varepsilon)]}{\log \varepsilon} \quad (6)$$

其中:

$$u_i(q, \varepsilon) = \frac{p_i^q(\varepsilon)}{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon)} \quad (7)$$

在本文中 $q$ 从-10到10变化,步长为1,当 $q < 1$ 时,较小集中程度区域的信息被放大;当 $q > 1$ 时,较大集中程度区域的信息被放大。 $\alpha(q)$ 和 $f(\alpha)$ 两个参数并不是对所有 $q$ 值都进行评估,而是在其可以利用 $\log \varepsilon$ 直线函数描述的范围内,代表样品的异质性水平。

定义 $q$ 阶矩的配分函数为:

$$u(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon) \sim \varepsilon^{\tau(q)} \quad (8)$$

$\tau(q)$ 可表示为:

$$\tau(q) = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \quad (9)$$

$D_q$ 是用于表征多重分形局部特征的另一套语言,可表示为<sup>[27-28]</sup>:

$$D_q = \frac{\tau(q)}{q-1} = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \quad q \neq 1 \quad (10)$$

对于单分形, $D_q$ 与 $q$ 是常数函数,因此不需要考察高阶矩来获取更多的信息。对于多重分形, $D_q$ 与 $q$ 之间呈单调递减的关系。当 $q > 0$ 时, $D_q$ 反映高孔隙度区域的孔隙分布特征;当 $q < 0$ 时, $D_q$ 反映低孔隙度区域的孔隙分布特征<sup>[29-30]</sup>。

为保证 $D_q$ 的连续性,利用洛必达法则对(10)式求极限可得 $D_1$ ,表示为:

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon) \times \lg p_i(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \quad (11)$$

## 3 实验结果与讨论

### 3.1 TOC及矿物组分

研究区风城组凝灰岩样品 TOC 为 0.533% ~ 1.460%,均值为 0.931%;全岩矿物组分分析显示,样品矿物组分以斜长石为主,其次是正长石、黏土矿物及石英,含有少量白云石和黄铁矿(表1)。其中,斜长石含量为 6.0% ~ 71.1%,均值为 45.63%;正长石、黏土矿物及石英含量分别为 0 ~ 32.3%, 4.4% ~ 34.7%, 5.6% ~ 17.8%,均值分别为 11.67%, 10.87% 及 11.42%;白云石含量为 1.7% ~ 45.5%,均值为 12.48%;黄铁矿含量为 0 ~ 1.6%,均值为 0.88%。

表1 哈11井风城组 TOC和矿物组分含量

Table1 TOC and mineral component content in Fengcheng Formation of Well Ha 11

样品 编号	深度/m	TOC/%	矿物组分含量/%						
			石英	正长 石	斜长 石	方解 石	白云 石	黄铁 矿	黏土 矿物
H11-1	3 930.00	0.862	9.7	0	71.1	5.7	5.9	1.6	6.0
H11-2	3 930.50	0.533	10	25.1	50.7	3.8	3.5	0.8	6.1
H11-3	3 931.05	0.902	11.7	8.9	59.5	3.5	12.0	0	4.4
H11-4	3 932.10	1.460	5.6	32.3	46	0	6.3	1.3	8.5
H11-5	3 932.50	0.897	17.8	3.7	40.5	0	1.7	1.6	34.7
H11-6	3 933.50	0.935	13.7	0	6.0	29.3	45.5	0	5.5

### 3.2 孔径分布特征

通过 CO<sub>2</sub> 吸附实验获取样品微孔的孔径分布曲线(图 2a),所有样品曲线形状相似,均呈三峰态,峰值分别为 0.33 ~ 0.38, 0.50 ~ 0.68 及 0.72 ~ 0.86 nm,表明这 3 个孔径范围内的孔隙较为发育。微孔孔体积为 0.000 6 ~ 0.001 8 cm<sup>3</sup>/g,均值为 0.001 2 cm<sup>3</sup>/g。微孔比表面积为 2.09 ~ 6.33 m<sup>2</sup>/g,均值为 4.14 m<sup>2</sup>/g(表 2)。通过 N<sub>2</sub> 吸附实验获取样品介-宏孔(2 ~ 100 nm)的孔径分布曲线(图 2b),曲线形态呈单峰态,峰值为 2.94 ~ 16.09 nm,表明该区间的介孔较为发育,介孔(2 ~ 50 nm)孔体积为 0.003 ~ 0.017 cm<sup>3</sup>/g,均值为 0.008 3 cm<sup>3</sup>/g,比表面积为 1.33 ~ 5.54 m<sup>2</sup>/g,均值为 2.76 m<sup>2</sup>/g。宏孔(50 ~ 100 nm)孔体积为 0.001 ~ 0.003 cm<sup>3</sup>/g,均值为 0.001 5 cm<sup>3</sup>/g,比表面积为 0.030 ~ 0.163 m<sup>2</sup>/g,均值为 0.084 2 m<sup>2</sup>/g。

### 3.3 基于 CO<sub>2</sub> 吸附的多重分形特征

由 CO<sub>2</sub> 等温吸附曲线计算得到  $u(q, \varepsilon)$ , 做其与  $\varepsilon$  的双对数曲线图,由图 3a 可见,  $\log u(q, \varepsilon)$  与  $\log \varepsilon$  存在明显的线性关系,表明 CO<sub>2</sub> 吸附孔径分布曲线具有多重分形性质<sup>[17,31]</sup>。当  $q > 0$  时,曲线的斜率为



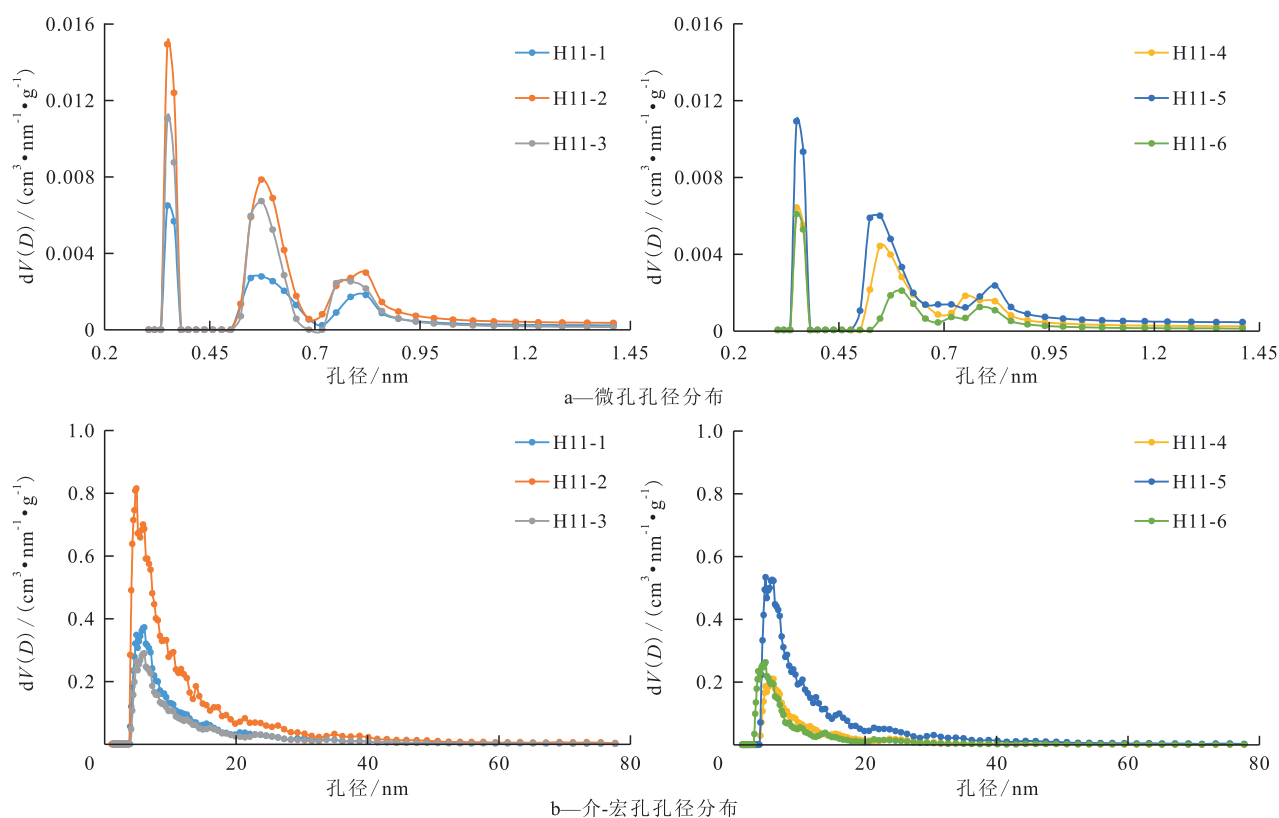


图2 微孔和介-宏孔的孔径分布

Fig.2 Pore size distribution of micropores and meso-macropores

表2 凝灰岩孔隙结构参数  
Table2 Tuff pore structure parameters

样品编号	孔体积/(cm³·g⁻¹)			比表面积/(m²·g⁻¹)		
	<2 nm	2~50 nm	50~100 nm	<2 nm	2~50 nm	50~100 nm
H11-1	0.000 9	0.008	0.001	3.06	2.53	0.073
H11-2	0.001 8	0.017	0.003	6.33	5.54	0.163
H11-3	0.001 3	0.006	0.001	4.65	2.01	0.064
H11-4	0.001 0	0.004	0.001	3.42	1.33	0.042
H11-5	0.001 5	0.012	0.002	5.24	3.79	0.133
H11-6	0.000 6	0.003	0.001	2.09	1.39	0.030

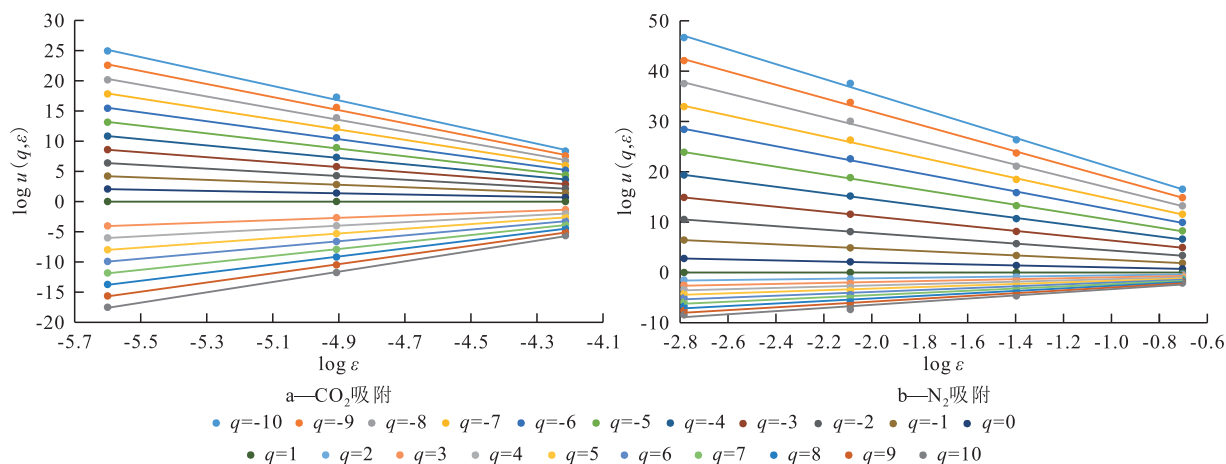


图3 配分函数  $u(q, \epsilon)$  与盒子长度  $\epsilon$  的双对数曲线

Fig.3 Log-log curve of partition function  $u(q, \epsilon)$  and length  $\epsilon$

正;当 $q < 0$ 时,曲线的斜率为负。且当 $q > 0$ 时双对数曲线更加密集,表明高概率测量区的孔隙主要分布在较窄范围内<sup>[31]</sup>。

做所有样品CO<sub>2</sub>吸附的多重分形广义分形维数谱。由图4a可见,所有样品曲线均呈反“S”形, $D_q$ 随 $q$ 的增大而减小,表明孔径分布具有多重分形性质。表3列出了广义分形维数谱的相关参数,用于表征样品孔隙的非均质性与连通性。 $D_0$ 反映非空盒子在不同标度下密度概率的分形测度<sup>[29]</sup>,所有样品的 $D_0$ 均为1。 $D_1$ 反映孔径分布在孔径区间内的集中程

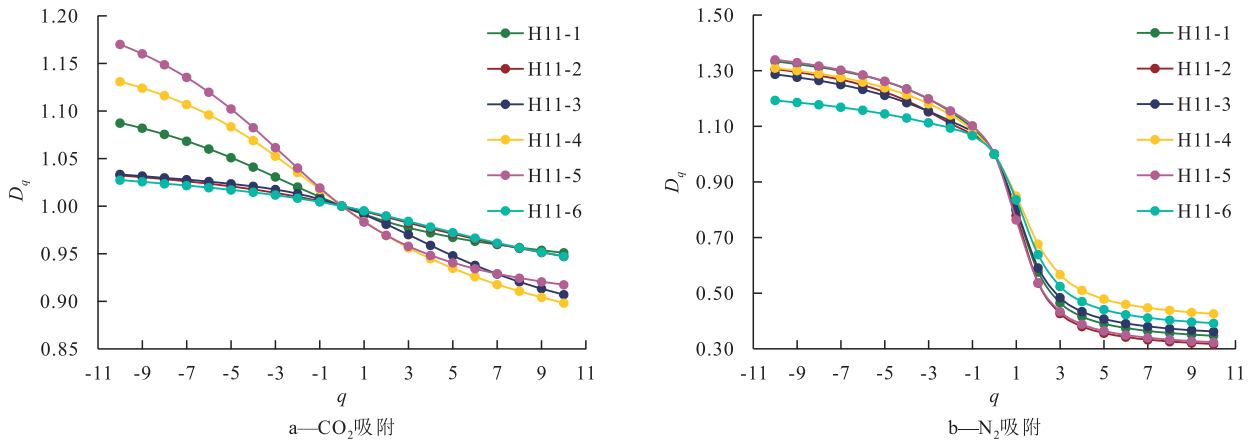


图4 多重分形广义分形维数谱

Fig.4 Multifractal generalized fractal dimension spectrum

度<sup>[32]</sup>,范围为0.983~0.995。指标 $D_0-D_1$ 用于描述孔径分布的离散程度, $D_0-D_1$ 值越小,表示孔径分布越均匀,反之亦然,所有样品 $D_0-D_1$ 的变化范围为0.005~0.017。 $D_2$ 反映第二个采样时刻的行为<sup>[33]</sup>,范围为0.969~0.990。 $H$ 用于描述孔隙度的正自相关性以及不同尺寸孔径网络之间的孔隙连通性, $H$ 值越高,表示样品具有较好的自相关性和连通性<sup>[25,33]</sup>,使用 $(D_2+1)/2$ 计算, $H$ 值范围为0.985~0.995。广义分形维数谱的宽度( $D_{10^-}-D_{10^+}$ )用来描述 $\text{CO}_2$ 吸附获取的整个范围(0~2 nm)内孔径的非均质性,谱宽度越大,相应区域的孔隙非均质性越强,其变化范围为0.080~0.252。广义分形维数谱左侧宽度( $D_{10^-}-D_0$ )和右侧宽度( $D_0-D_{10^+}$ )分别用来描述高概率测量区和低概率测量区的孔径分布非均质性,二者的变化范围分别为0.027~0.170与0.049~0.102。

做所有样品 $\text{CO}_2$ 吸附的多重分形奇异谱,由图5a可见, $f(\alpha)$ 与 $\alpha(q)$ 呈非对称抛物线形状的凸函数关系,表明孔径分布具有多重分形的性质。表4列出了多重分形奇异谱的相关参数,当 $q$ 为0时,奇异性指数取值为 $\alpha_0$ ,用于描述孔径分布的非均质性, $\alpha_0$ 值越大,孔径分布的非均质性越强,其变化范围为1.005~1.018。取 $\alpha(q)$ 的最大值和最小值分别为 $\alpha_{10^-}$ 和 $\alpha_{10^+}$ ,二者的变化范围分别为1.047~1.270与

0.848~0.928。 $f(\alpha)$ 的谱宽( $\Delta\alpha$ )为奇异性指数最大值与最小值的差值( $\alpha_{10^-}-\alpha_{10^+}$ ),用于描述 $\text{CO}_2$ 吸附整体孔隙空间分布的复杂程度, $\Delta\alpha$ 值越大,孔径分布的非均质性越强,所有样品 $\Delta\alpha$ 值的变化范围为0.137~0.380。 $f(\alpha)$ 曲线对称线左右两侧分别代表高概率密度区与低概率密度区,定义 $R_d$ 表示 $f(\alpha)$ 谱偏离对称线的程度,计算公式为:

$$R_d = (\alpha_0 - \alpha_{10^+}) - (\alpha_{10^-} - \alpha_0) \quad (12)$$

当 $R_d > 0$ 时,表示低概率密度区对整体孔径分布的非均质性贡献更大;当 $R_d < 0$ 时,表示高概率密度区对整体孔径分布的非均质性贡献更大<sup>[34-35]</sup>。定义 $\Delta f$ 用于描述多重分形奇异谱的形状特征,计算公式为:

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} \quad (13)$$

当 $\Delta f > 0$ 时,多重分形奇异谱呈左钩状,表明高概率密度区对孔径分布的非均质性贡献更大;当 $\Delta f < 0$ 时,多重分形奇异谱呈右钩状,表明低概率密度区对孔径分布的非均质性贡献更大。

### 3.4 基于 $\text{N}_2$ 吸附的多重分形特征

由 $\text{N}_2$ 吸附实验获取 $u(q, \varepsilon)$ ,做 $u(q, \varepsilon)$ 与 $\varepsilon$ 的双对数曲线图,由图3b可见, $\log u(q, \varepsilon)$ 与 $\log \varepsilon$ 存在明显的线性关系,表明 $\text{N}_2$ 吸附孔径分布具有多重分形性质。当 $q > 0$ 时,与基于 $\text{CO}_2$ 吸附的 $\log u(q, \varepsilon)$

表3  $\text{CO}_2$ 吸附广义分形维数谱参数

Table3 Generalized fractal dimension spectrum parameters of  $\text{CO}_2$  adsorption

样品编号	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_{10^-}$	$D_{10^+}$	$D_0-D_1$	$D_{10^-}-D_{10^+}$	$H$	$D_{10^-}-D_0$	$D_0-D_{10^+}$
H11-1	1.000	0.991	0.984	1.087	0.951	0.009	0.136	0.992	0.087	0.049
H11-2	1.000	0.994	0.988	1.032	0.947	0.006	0.085	0.994	0.032	0.053
H11-3	1.000	0.991	0.981	1.033	0.907	0.009	0.126	0.990	0.033	0.093
H11-4	1.000	0.984	0.969	1.131	0.898	0.016	0.232	0.985	0.131	0.102
H11-5	1.000	0.983	0.969	1.170	0.917	0.017	0.252	0.985	0.170	0.083
H11-6	1.000	0.995	0.990	1.027	0.947	0.005	0.080	0.995	0.027	0.053

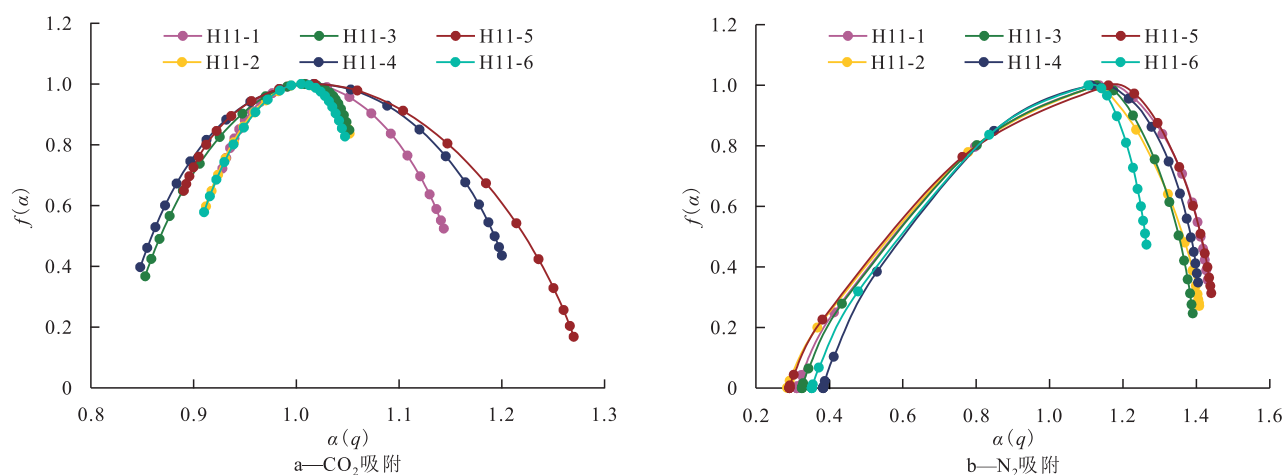


图5 多重分形奇异谱

Fig.5 Multifractional singular fractal spectrum

表4 CO<sub>2</sub>吸附多重分形奇异谱参数  
Table4 Multifractional singular spectrum parameters of CO<sub>2</sub> adsorption

样品编号	$\alpha_0$	$\alpha_{10^-}$	$\alpha_{10^+}$	$\Delta\alpha$	$f_{max}$	$f_{min}$	$\Delta f$	$R_d$
H11-1	1.009	1.144	0.928	0.215	0.722	0.524	-0.198	0.053
H11-2	1.005	1.052	0.912	0.140	0.597	0.836	0.239	-0.047
H11-3	1.008	1.052	0.853	0.199	0.367	0.848	0.481	-0.112
H11-4	1.017	1.200	0.848	0.352	0.397	0.436	0.038	0.014
H11-5	1.018	1.270	0.890	0.380	0.648	0.168	-0.480	0.125
H11-6	1.005	1.047	0.910	0.137	0.579	0.827	0.249	-0.052

与  $\log \varepsilon$  双对数曲线相比,基于N<sub>2</sub>吸附的双对数曲线更加密集,表明N<sub>2</sub>吸附实验所获取的高概率密度区的孔隙分布更加狭窄。

做所有样品基于N<sub>2</sub>吸附的多重分形广义分形维数谱。由图4b可见, $D_q$ 随着 $q$ 的增大而单调递减,且当 $q < 0$ 时缓慢减小,当 $q > 0$ 时快速减小,表明N<sub>2</sub>吸附实验所测孔隙具有多重分形性质。表5列出了广义分形维数谱的相关参数,N<sub>2</sub>吸附的 $D_0-D_1$

值较CO<sub>2</sub>吸附的大,变化范围为0.151~0.237,表明N<sub>2</sub>吸附所测介-宏孔的孔隙非均质性更强。N<sub>2</sub>吸附的 $H$ 值较CO<sub>2</sub>吸附的小,变化范围为0.768~0.838,表明N<sub>2</sub>吸附所测介-宏孔的孔隙自相关性及其连通性较差。 $D_{10^-}-D_{10^+}$ , $D_{10^-}-D_0$ , $D_0-D_{10^+}$ 值的变化范围分别为0.801~1.015,0.193~0.339,0.574~0.683。N<sub>2</sub>吸附的 $D_{10^-}-D_{10^+}$ 值大于CO<sub>2</sub>吸附,同样证明了N<sub>2</sub>吸附所测介-宏孔的孔径分布的非均质性更强。所有样品基于N<sub>2</sub>吸附的 $D_0-D_{10^+}$ 值均大于 $D_{10^-}-D_0$ 值,表明孔隙非均质性主要受高概率密度区控制,孔径范围大致为3~20 nm。

做基于N<sub>2</sub>吸附的多重分形奇异谱,由图5b可见, $f(\alpha)$ 与 $\alpha(q)$ 呈非对称抛物线形状的凸函数关系,表明N<sub>2</sub>吸附所测孔隙具有多重分形性质,这与前文中多重分形广义分形维数谱的结果相一致。多重分形奇异谱的相关参数列于表6中, $\Delta\alpha$ 值变化范围为0.912~1.150,N<sub>2</sub>吸附的 $\Delta\alpha$ 值大于CO<sub>2</sub>吸附,同样证明了N<sub>2</sub>吸附所测孔隙非均质性较强。所有样品的 $R_d$ 值均小于0, $\Delta f$ 值均大于0,多重分形奇异谱呈左钩状,表明在N<sub>2</sub>吸附所测孔隙中,高概率密度区对整体孔径分布的非均质性贡献更大。

表5 N<sub>2</sub>吸附广义分形维数谱参数  
Table5 Generalized fractal dimension spectrum parameters of N<sub>2</sub> adsorption

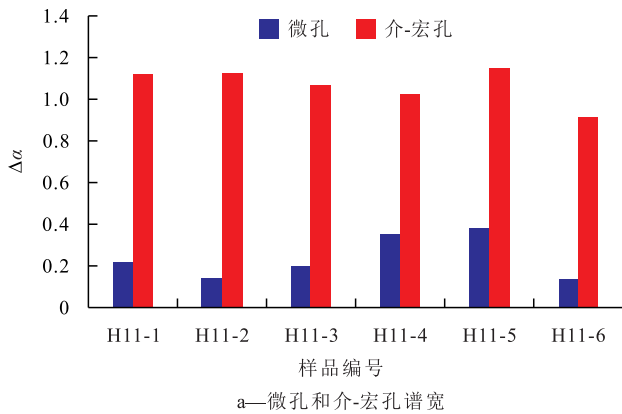
样品编号	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_{10^-}$	$D_{10^+}$	$D_0-D_1$	$D_{10^-}-D_{10^+}$	$H$	$D_{10^-}-D_0$	$D_0-D_{10^+}$
H11-1	1.000	0.797	0.576	1.333	0.347	0.203	0.986	0.788	0.333	0.653
H11-2	1.000	0.779	0.536	1.305	0.317	0.221	0.988	0.768	0.305	0.683
H11-3	1.000	0.802	0.591	1.287	0.362	0.198	0.924	0.796	0.287	0.638
H11-4	1.000	0.849	0.676	1.309	0.426	0.151	0.883	0.838	0.309	0.574
H11-5	1.000	0.763	0.537	1.339	0.324	0.237	1.015	0.769	0.339	0.676
H11-6	1.000	0.836	0.638	1.193	0.392	0.164	0.801	0.819	0.193	0.608

表6 N<sub>2</sub>吸附多重分形奇异谱参数  
Table6 Multifractal singular spectrum parameters of N<sub>2</sub> adsorption

样品编号	$\alpha_0$	$\alpha_{10^-}$	$\alpha_{10^+}$	$\Delta\alpha$	$f_{max}$	$f_{min}$	$\Delta f$	$R_d$
H11-1	1.136	1.431	0.312	1.119	0	0.357	0.357	-0.529
H11-2	1.126	1.409	0.285	1.123	0	0.271	0.271	-0.558
H11-3	1.129	1.391	0.326	1.065	0	0.247	0.247	-0.541
H11-4	1.114	1.405	0.383	1.022	0	0.349	0.349	-0.440
H11-5	1.161	1.441	0.291	1.150	0	0.314	0.314	-0.589
H11-6	1.107	1.265	0.353	0.912	0	0.473	0.473	-0.596

### 3.5 微孔与介-宏孔多重分形特征的差异

通过对比微孔与介-宏孔多重分形参数(图6)发现,微孔的 $\Delta\alpha$ 值较介-宏孔小, $H$ 值较介-宏孔大,说明微孔具有更好的连通性和均质性。对于介-宏孔非均质性最强的样品,其微孔的非均质性并不是最强,即微孔与介-宏孔的非均质性并不存在明显的线性关系,因此微孔与介-宏孔的非均质性应分别进行分析。此外,微孔和介-宏孔的 $\Delta\alpha$ 与 $H$ 之间呈较强的负相关关系(图7),表明孔隙的均质性越好,其连通性越强。



### 3.6 孔隙结构、矿物组分与多重分形特征的关系

选取多重分形代表性参数 $\Delta\alpha$ 与 $H$ ,分别研究孔隙结构、TOC及矿物组分与多重分形特征之间的关系。

由于所测孔隙孔体积与比表面积之间的相关性较强( $R^2 > 0.99$ ),因此,仅选取孔体积讨论其与多重分形参数之间的关系。建立孔体积与多重分形参数之间的关系,由图8可见,微孔孔体积与 $\Delta\alpha$ , $H$ 之间无相关性,介-宏孔孔体积与 $\Delta\alpha$ 呈正相关关系,与 $H$ 呈负相关关系,表明随着介-宏孔孔体积的增加,孔隙的空间分布更加集中,孔隙的非均质性增强,连通性变弱。

由图9可见,TOC与介-宏孔的 $H$ 呈较强的正相关关系,方解石、白云石含量与介-宏孔的 $\Delta\alpha$ 呈较强的负相关关系,TOC和黏土矿物含量与微孔 $\Delta\alpha$ 呈弱正相关关系,与微孔 $H$ 呈弱负相关关系,方解石含量与微孔 $H$ 呈弱正相关关系,与微孔 $\Delta\alpha$ 呈弱负相关关系。结果表明,TOC的增加导致微孔的非均质性增强,提高了微孔、介-宏孔的连通性。斜长石含量的增加导致介-宏孔的非均质性增强。黏土矿物

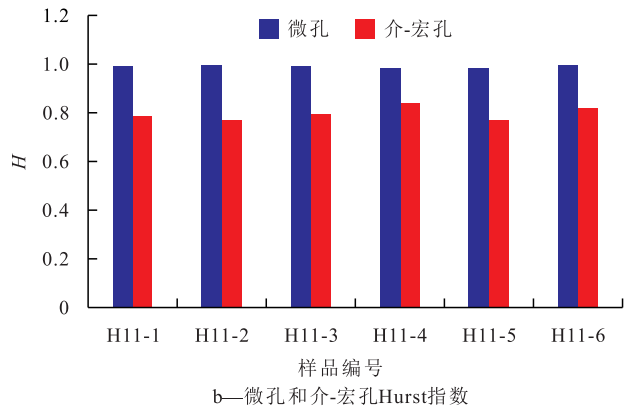


图6 样品孔隙多重分形参数对比

Fig.6 Multifractal parameter comparison of sample pores

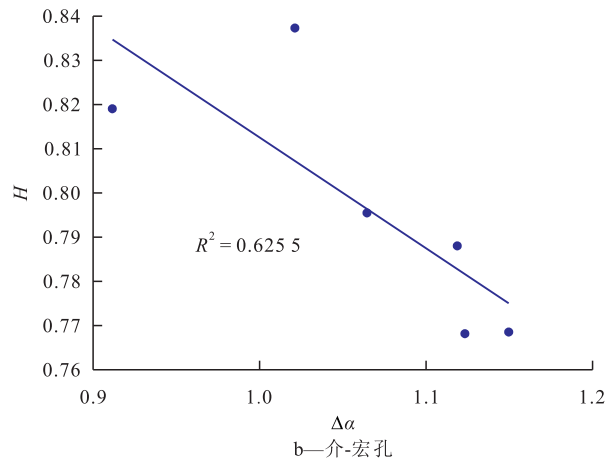
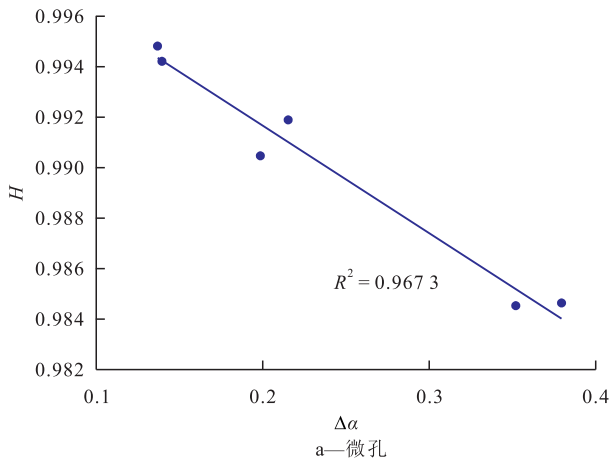


图7 H与 $\Delta\alpha$ 之间的关系

Fig.7 Relationship between  $H$  and  $\Delta\alpha$



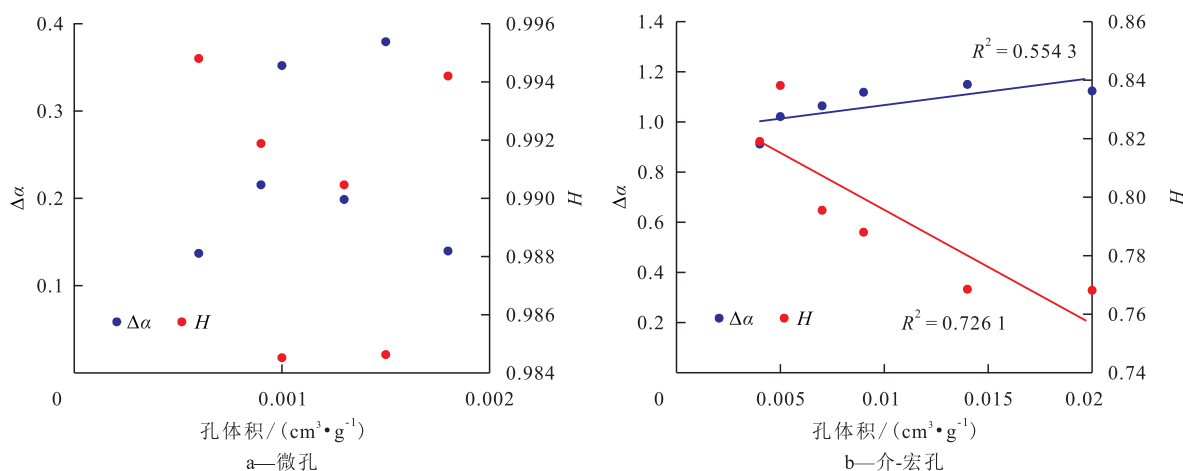


图8 孔体积与多重分形参数之间的关系

Fig.8 Relationship between pore volume and multifractal parameters

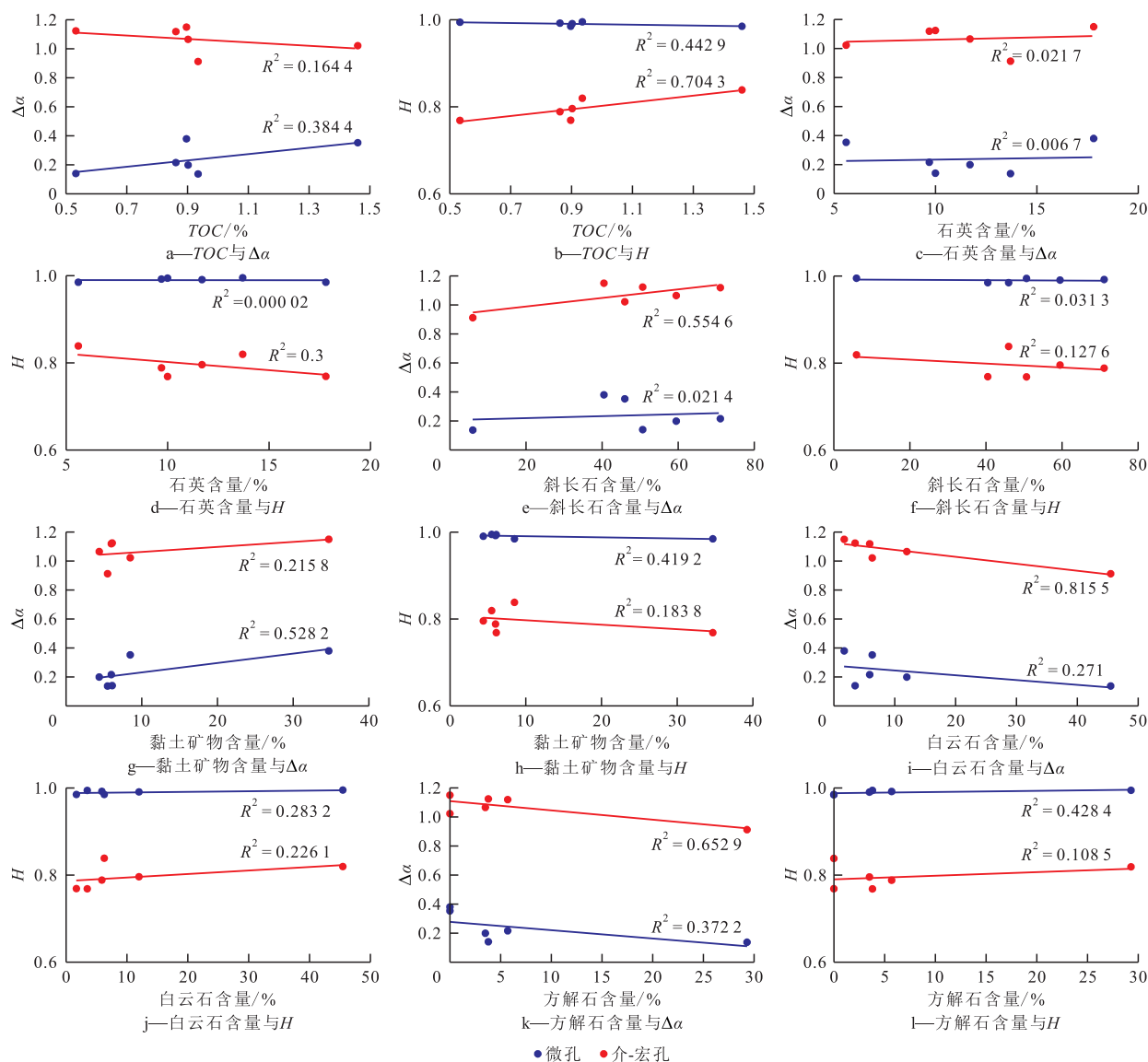


图9 TOC及矿物组分与多重分形参数之间的关系

Fig.9 TOC content and relationship between mineral composition and multifractal parameters

含量的增加增强了微孔的非均质性,降低了连通性。方解石含量的增加增强了微孔与介-宏孔的非

均质性,提高了微孔的连通性。白云石含量的增加导致介-宏孔的非均质性降低。

## 4 结论

基于CO<sub>2</sub>与N<sub>2</sub>吸附实验,运用多重分形理论,研究了风二段凝灰岩储层微孔与介-宏孔的非均质性与连通性,结果表明:相较于介-宏孔,微孔具有更好的连通性与均质性,微孔与介-宏孔的非均质性之间没有明显的线性关系。样品微孔、介-宏孔的非均质性与连通性存在明显的线性关系,孔隙的均质性越强,连通性越好。随着介-宏孔孔体积的增加,孔隙的非均质性增强,连通性变弱,而微孔孔体积与孔隙非均质性之间没有明显的线性关系。TOC和矿物组分对孔隙非均质性和连通性均有不同程度的影响,部分影响较为明显( $R^2>0.5$ ),TOC的增加提高了介-宏孔的连通性,斜长石含量的增加提高了介-宏孔的非均质性,黏土矿物含量的增加提高了微孔的非均质性,白云石和方解石含量的增加降低了介-宏孔的非均质性。

### 符号解释

$dV(D)$  —— 孔体积变化率,  $\text{cm}^3/(\text{nm}\cdot\text{g})$ ;  
 $D_0$  —— 容量维或计盒维数;  
 $D_1$  —— 信息维;  
 $D_2$  —— 关联维;  
 $D_{10+}$  —— 当 $q$ 为+10时的广义分形维数;  
 $D_{10-}$  —— 当 $q$ 为-10时的广义分形维数;  
 $D_q$  —— 与 $q$ 有关的广义分形维数;  
 $f(\alpha)$  —— 具有相同奇异性指数 $\alpha$ 的子集的分形维数;  
 $f_{\max}$  ——  $f(\alpha)$ 的最大值;  
 $f_{\min}$  ——  $f(\alpha)$ 的最小值;  
 $\Delta f$  —— 分形奇异谱的最大值与最小值的差值;  
 $H$  —— Hurst指数;  
 $i$  —— 整数,  $i=1, 2, 3, \dots$ ;  
 $k$  —— 划分区间的段数;  
 $N$  —— 气体吸附曲线上的点数;  
 $N(\epsilon)$  —— 计盒法中的盒子总个数;  
 $N_a(\epsilon)$  —— 具有相同概率质量值的盒子个数;  
 $N_i(\epsilon)$  —— 第 $i$ 个盒子的气体吸附体积,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  
 $N_T$  —— 吸附在孔隙中的气体总体积,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  
 $\Delta n_i$  —— 气体吸附曲线上两相邻点之间的气体吸附量的差值,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  
 $p_i(\epsilon)$  —— 概率质量函数;  
 $q$  —— 统计矩阶数;  
 $R_d$  —— 左半偏与右半偏的差值;  
 $\alpha_i$  —— 第 $i$ 个奇异性指数;  
 $\alpha_0$  —— 当 $q$ 为0时的奇异性指数;

$\alpha_{10+}$  —— 当 $q$ 为+10时的奇异性指数;  
 $\alpha_{10-}$  —— 当 $q$ 为-10时的奇异性指数;  
 $\alpha(q)$  —— 奇异性指数集合;  
 $\Delta\alpha$  —— 奇异谱谱宽,奇异性指数最大值与最小值的差值;  
 $\epsilon$  —— 计盒法中的盒子长度;  
 $u(q, \epsilon)$  —— 配分函数;  
 $u_i(q, \epsilon)$  —— 概率密度族;  
 $u_i(\epsilon)$  —— 计盒维数中的测度;  
 $\tau(q)$  ——  $q$ 阶质量指数。

### 参考文献

- [1] 曾韬,俞凌杰,夏文谦,等.元坝地区吴家坪组沉凝灰岩及凝灰质泥岩储层微观孔隙结构特征研究[J].矿物岩石,2022,42(4):83-93.  
ZENG Tao, YU Lingjie, XIA Wenqian, et al. Pore structure characteristics of tuff and tuffaceous mudstone reservoirs in Wujiaping Formation, Yuanba area [J]. Mineralogy and Petrology, 2022, 42(4): 83-93.
- [2] 蒋宜勤,柳益群,杨召,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷凝灰岩型致密油特征与成因[J].石油勘探与开发,2015,42(6):741-749.  
JIANG Yiqin, LIU Yiqun, YANG Zhao, et al. Characteristics and origin of tuff-type tight oil in Jimusar Depression, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 741-749.
- [3] 俞雨溪,王宗秀,张凯逊,等.流体注入法定量表征页岩孔隙结构测试方法研究进展[J].地质力学学报,2020,26(2):201-210.  
YU Yuxi, WANG Zongxiu, ZHANG Kaixun, et al. Advances in quantitative characterization of shale pore structure by using fluid injection methods [J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(2): 201-210.
- [4] 孙超,姚素平.页岩油储层孔隙发育特征及表征方法[J].油气地质与采收率,2019,26(1):153-164.  
SUN Chao, YAO Suping. Pore structure and characterization methods of shale oil reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 153-164.
- [5] 苟启洋,徐尚,郝芳,等.纳米CT页岩孔隙结构表征方法——以JY-1井为例[J].石油学报,2018,39(11):1253-1261.  
GOU Qiyang, XU Shang, HAO Fang, et al. Characterization method of shale pore structure based on nano-CT: a case study of Well JY-1 [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(11): 1253-1261.
- [6] 焦堃,姚素平,吴浩,等.页岩油储层孔隙系统表征方法研究进展[J].高校地质学报,2014,20(1):151-161.  
JIAO Kun, YAO Suping, WU Hao, et al. Advances in characterization of pore system of gas shales [J]. Geological Journal of China Universities, 2014, 20(1): 151-161.
- [7] WANG Fong, ZAI Yun. Fractal and multifractal characteristics of shale nanopores [J]. Results in Physics, 2021, 25: 104277.

- [8] 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.
- [9] 唐玄,郑逢赞,梁国栋,等.黔北寒武系牛蹄塘组页岩孔隙分形表征[J].地学前缘,2023,30(3):110-123.  
TANG Xuan, ZHENG Fengzan, LIANG Guodong, et al. Fractal characterization of pore structure in Cambrian Niutitang shale in northern Guizhou, southwestern China [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(3): 110-123.
- [10] 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):1496-1516.  
LIU Ruobing, WEI Zhihong, JIA Aoqi, et al. Fractal characteristics of pore structure in deep overpressured organic-rich shale in Wufeng-Longmaxi Formation in Southeast Sichuan and its geological significance [J]. Earth Science, 2023, 48(4): 1496-1516.
- [11] 林子智,卢双舫,常象春,等.陆相页岩微观孔隙结构及分形特征——以徐家围子断陷沙河子组为例[J].煤田地质与勘探,2021,49(1):151-160.  
LIN Zizhi, LU Shuangfang, CHANG Xiangchun, et al. Micro-pore structure and fractal characteristics of terrestrial shales: A case study of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 151-160.
- [12] LI Wei, LIU Hongfu, SONG Xiaoxia. Multifractal analysis of Hg pore size distributions of tectonically deformed coals [J]. International Journal of Coal Geology, 2015, 4(11): 144-145.
- [13] 王子萌,蒋裕强,付永红,等.基于核磁共振表征渝西地区五峰组-龙一1亚段页岩储层孔隙结构及非均质性[J].地球科学,2022,47(2):490-504.  
WANG Zimeng, JIANG Yuqiang, FU Yonghong, et al. Characterization of pore structure and heterogeneity of shale reservoir from Wufeng Formation-Sublayers Long-1<sub>1</sub> in Western Chongqing based on nuclear magnetic resonance [J]. Earth Science, 2022, 47(2): 490-504.
- [14] 梁志凯,李卓,李连霞,等.松辽盆地长岭断陷沙河子组页岩孔隙多重分形特征与岩相的关系[J].岩性油气藏,2020,32(6):22-35.  
LIANG Zhikai, LI Zhuo, LI Lianxia, et al. Relationship between multifractal characteristics of pore size and lithofacies of shale of Shahezi Formation in Changling fault depression, Songliao Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(6): 22-35.
- [15] 王民,焦晨雪,李传明,等.东营凹陷沙河街组页岩微观孔隙多重分形特征[J].油气地质与采收率,2019,26(1):72-79.  
WANG Min, JIAO Chenxue, LI Chuanming, et al. Multifractal characteristics of micro-pores of Shahejie Formation shale in Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 72-79.
- [16] WANG Pengfei, JIANG Zhenxue, JI Wenming, et al. Heterogeneity of intergranular, intraparticle and organic pores in Longmaxi shale in Sichuan Basin, South China: Evidence from SEM digital images and fractal and multifractal geometries [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 72: 122-138.
- [17] ZHAO Peiqiang, WANG Zhenlin, SUN Zhongchun, et al. Investigation on the pore structure and multifractal characteristics of tight oil reservoirs using NMR measurements: Permian Lucaogou Formation in Jimusaer Sag, Junggar Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86: 1067-1081.
- [18] 曾治平,柳忠泉,赵乐强,等.准噶尔盆地西北缘哈山地区二叠系风城组页岩油储层特征及其控制因素[J].岩性油气藏,2023,35(1):25-35.  
ZENG Zhiping, LIU Zhongquan, ZHAO Leqiang, et al. Shale oil reservoir characteristics and controlling factors of Permian Fengcheng Formation in Hashan area, northwestern margin of Junggar Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(1): 25-35.
- [19] 张奎华,孙中良,张关龙,等.准噶尔盆地哈山地区下二叠统风城组泥页岩优势岩相与页岩油富集模式[J].石油实验地质,2023,45(4):593-605.  
ZHANG Kuihua, SUN Zhongliang, ZHANG Guanlong, et al. Shale dominant lithofacies and shale oil enrichment model of Lower Permian Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 593-605.
- [20] 李振明,熊伟,王斌,等.准噶尔盆地哈山地区二叠系风城组细粒沉积特征与演化模式[J].石油实验地质,2023,45(4):693-704.  
LI Zhenming, XIONG Wei, WANG Bin, et al. Fine-grained sedimentary characteristics and evolution model of Permian Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(4): 693-704.
- [21] GAO Weizheng, CHANG Xiangchun, ZHANG Pengfei, et al. Characterization on structure and fractal of shale nanopore: A case study of Fengcheng Formation in Hashan Area, Junggar Basin, China [J]. Processes, 2023, 11(3): 677.
- [22] 杜敏,王丽,白静芳,等.沉积岩中总有机碳测定:GB/T 19145—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.  
DU Min, WANG Li, BAI Jingfang, et al. Determination for total organic carbon in sedimentary rock: GB/T 19145-2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [23] 周素红,邹涛,余方,等.压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第3部分:气体吸附法分析微孔:GB/T 21650.3—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.  
ZHOU Suhong, ZOU Tao, YU Fang, et al. Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption-Part 3: Analysis of micropores by gas adsorption: GB/T 21650.3-2011 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [24] 朱庆山,黄文来,周素红,等.压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第2部分:气体吸附法分析介孔和大孔:GB/T 21650.2—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.  
ZHU Qingshan, HUANG Wenlai, ZHOU Suhong, et al. Pore size distribution and porosity of solid materials by mercury porosimetry and gas adsorption-Part 2: Analysis of mesopores and

- macropores by gas adsorption: GB/T 21650.2-2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [25] SONG Yu, JIANG Bo, SHAO Pei, et al. Matrix compression and multifractal characterization for tectonically deformed coals by Hg porosimetry [J]. *Fuel*, 2018, 211: 661-675.
- [26] FERREIRO J Paz, WILSON M, VÁZQUEZ E Vidal. Multifractal description of nitrogen adsorption isotherms [J]. *Vadose Zone Journal*, 2009, 8(1): 209-219.
- [27] 郭德勇, 郭晓洁, 李德全. 构造变形对烟煤级构造煤微孔-中孔的作用[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(10): 3 135-3 144.
- GUO Deyong, GUO Xiaojie, LI Dequan. Effects of tectonic deformation on micropore-mesopore of bituminous deformed coal [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44 (10) : 3 135-3 144.
- [28] QU Kaixuan, GUO Shaobin. Investigation of the pore structure of tight sandstone based on multifractal analysis from NMR measurement: A case from the Lower Permian Taiyuan Formation in the southern north China basin [J]. *Energies*, 2020, 13 (16) : 4 067.
- [29] GUAN Ming, LIU Xiaoping, JIN Zhijun, et al. The heterogeneity of pore structure in lacustrine shales: Insights from multifractal analysis using N<sub>2</sub> adsorption and mercury intrusion [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 114: 104150.
- [30] XIE Guoliang, JIAO Kun, DENG Bin, et al. Pore characteristics and preservation mechanism of over-6000-m ultra-deep shale reservoir in the Sichuan Basin [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 11: 1059869.
- [31] TONG Zhongzheng, ZHANG Jinchuan, LI Zhen, et al. Investigation of organic-shale nanopores in the Lower Cambrian Niutitang Formation using low temperature N<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> adsorption: Multifractality and classification [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2022, 337: 111935.
- [32] WANG Yang, CHENG Hongfei, HU Qinhong, et al. Pore structure heterogeneity of Wufeng-Longmaxi shale, Sichuan Basin, China: Evidence from gas physisorption and multifractal geometries [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 208: 109313.
- [33] LIU Kouqi, OSTADHASSAN Mehdi, ZOU Jie, et al. Multifractal analysis of gas adsorption isotherms for pore structure characterization of the Bakken Shale [J]. *Fuel*, 2018, 219: 296-311.
- [34] WANG Meng, LI Zhou, LIANG Zhikai, et al. Method selection for analyzing the mesopore structure of shale--using a combination of multifractal theory and low-pressure gas adsorption [J]. *Energies*, 2023, 16(5) : 2 464.
- [35] WANG Huijun, CHEN Shangbin, LI Xueyuan, et al. Quantitative characterization of fracture in the coal of Shanxi and Taiyuan Formations based on an image processing method and multifractal theory [J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35 (15) : 12 019-12 029.

编辑 林 璐