DOI:10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511040134

鄂尔多斯盆地中东部深部煤储层孔隙多尺度联合表征及多重分形特征

范立勇[1,2]，陈 跃[3,*]，王怀厂[1,2]，杜小伟[1,2]

（1. 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院，陕西 西安 710018；2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室，陕西 西安 710018；
3. 西安科技大学地质与环境学院，陕西 西安 710054）

摘要：近年来我国深部煤层气勘探开发取得重大突破，展示出广阔的开发前景，但深部煤层气地质条件与浅部存在显著差异，探究深部储层孔隙结构特征对提高深部煤层气开发效率至关重要。以鄂尔多斯盆地中东部本溪组8#煤层为研究对象，联合采用低温CO_2吸附、低温N_2吸附、高压压汞等实验手段，结合多重分形理论，对深部煤储层微孔（< 2 nm）、介孔（2 ~ 50 nm）和宏孔（> 50 nm）的孔隙特征及非均质性进行定量表征。研究结果表明，深部煤储层孔隙表现为微孔或微孔-宏孔优势型，其中微孔孔径呈双峰型分布，0. 3 ~ 0. 4 nm和0. 4 ~ 0. 8 nm为优势孔径段；介孔孔径呈单峰分布，3 ~ 11 nm为优势孔径段；宏孔孔径分布近似单调递减，50 ~ 100 nm为优势孔径段；微孔和宏孔相对发育，介孔较少。深部煤样微孔、介孔、宏孔的广义维数谱［D（q）-q］均呈反“S”形态，多重分形奇异谱［f（α）-α］均呈上凸抛物线形态，多重分形特征明显。其中，相比于介孔，微孔的$\Delta\alpha$（奇异谱宽）较小和H（Hurst指数）较大，宏孔则反之，表明深部煤储层微孔均质性和连通性较高。本研究为深部储层孔隙结构及非均质性定量化评价提供了理论依据。

关键词：全孔径；多重分形；非均质性；深部煤层；本溪组；石炭系；鄂尔多斯盆地

中图分类号：P618. 1；TE122. 2 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-8527(2026)01-0113-15

Combined Multi-Scale Characterization and Multifractal Characteristics of Deep Coal Reservoir Pores in the Central-Eastern Ordos Basin

FAN Liyong[1,2], CHEN Yue[3,*], WANG Huaichang[1,2], DU Xiaowei[1,2]

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi* 710018, *China*; 2. *National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi* 710018, *China*; 3. *College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*)

Abstract: In recent years, significant breakthroughs have been made in the exploration and development of deep coalbed methane (CBM) in China, revealing promising prospects. However, the geological conditions of deep CBM reservoirs differ markedly from those of shallow ones, making the investigation of pore structure characteristics crucial for enhancing deep CBM recovery efficiency. This study focuses on the No. 8 coal seam of the Benxi Formation in the central-eastern Ordos Basin. By integrating multiple analytical techniques, including

收稿日期：2025-11-04；**修回日期：**2026-01-23；**编辑：**董立。

基金项目：国家科技重大专项课题（2025ZD1404202）；中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技专项（2023ZZ18YJ02）；低渗透油气田勘探开发国家工程实验室开放基金课题（KFKT2024-02）。

作者简介：范立勇，男，教授级高级工程师，博士，1978年出生，主要从事油气地质勘探及新能源开发利用。Email：lyfan123_cq@petrochina. com. cn。

＊通信作者：陈跃，男，副教授，博士，1988年出生，主要从事非常规天然气地质研究。Email：cyxust@126. com。

引用格式：范立勇，陈跃，王怀厂，等. 鄂尔多斯盆地中东部深部煤储层孔隙多尺度联合表征及多重分形特征［J］. 现代地质，2026，40（1）：113-127. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511040134.

FAN Liyong，CHEN Yue，WANG Huaichang，et al. Combined Multi-Scale Characterization and Multifractal Characteristics of Deep Coal Reservoir Pores in the Central-Eastern Ordos Basin［J］. GEOSCIENCE，2026，40（1）：113-127. DOI：10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202511040134.

low-temperature CO_2 adsorption, low-temperature N_2 adsorption, and high-pressure mercury intrusion experiments, with multifractal theory, the pore characteristics and heterogeneity of micropores (< 2 nm), mesopores (2 - 50 nm), and macropores (> 50 nm) in deep coal reservoirs were quantitatively characterized. The results indicate that the pore system is predominantly composed of micropores or a micropore - macropore assemblage. Micropores exhibit a bimodal distribution, with dominant pore size ranges of 0.3 - 0.4 nm and 0.4 - 0.8 nm. Mesopores show a unimodal distribution, with a dominant range of 3 - 11 nm, while macropores follow an approximately monotonically decreasing trend, dominated by sizes of 50 - 100 nm. Micropores and macropores are relatively well-developed, whereas mesopores are less abundant. The generalized dimension spectra [$D(q)$ - q] of all three pore types display an inverse "S" shape, and their multifractal singularity spectra [$f(\alpha)$ - α] exhibit upward-convex parabolic curves, indicating distinct multifractal behavior. Compared to mesopores, micropores have a smaller singularity spectrum width ($\Delta\alpha$) and a larger Hurst exponent (H), suggesting higher homogeneity and connectivity, while macropores show the opposite trend. This study provides a theoretical basis for the quantitative evaluation of pore structures and their heterogeneity in deep reservoirs.

Key words: full-scale pore size; multifractal; heterogeneity; deep coal seam; Benxi formation; Carboniferous; Ordos Basin

0 引 言

国家"十四五"规划纲要明确指出，我国将在2035年广泛形成绿色生产生活方式，实现碳达峰后稳中有降，强调加快深海、深层和非常规油气资源利用，构建现代能源体系。"十三五"期间，以非常规油气为代表的低品位资源逐渐成为中国能源勘探开发的主体，"十四五"期间，非常规油气产量占比将进一步提升，重点区域产能有望实现快速增长[1-2]。煤层气作为重要的非常规油气资源之一，其勘探开发和利用具有环保和减灾的双重意义。自2021年以来，深部煤层气勘探开发不断取得突破，特别是大宁—吉县区块，最高日产量突破10.0×10^4 m^3。但深部煤层地质条件显著异于浅部煤层[3]，深部高温、高压、高地应力的条件对储层孔隙特征的影响尚不清楚。因此，进一步深化对深部煤层孔隙结构特征的认识，有利于推动深部煤层气高效开发利用。

煤储层具有典型的低孔隙度、低渗透率、强非均质性特征，制约着煤层气的开发[4]。目前煤层孔隙的研究方法主要有扫描电镜、CT技术、小角X射线散射实验、低场核磁共振、高压压汞、低温N_2吸附和CO_2吸附等[5-11]，以上方法各有长短，但在孔隙不同形状间的复杂性与差异性量化表征方面尚有不足[12]。因此分形理论逐渐被应用于煤孔隙研究，其中Menger海绵模型、Brunauer-Emmett-Teller（BET）模型、Frenkel-Halsey-Hill（FHH）模型和Langmuir模型等多种单重分形模型被广泛应用于各类研究[13-17]。但在不同样品、不同局域、不同尺度孔径的非均质性描述上还存在不足[18-19]，故在单重分形的基础上扩展出了多重分形理论[20-21]。多重分形理论通过将单一分形维数扩展为连续的奇异谱函数，可以对多孔介质的结构非均质特征进行更准确更详细的描述[22]，且多重分形理论理论上可应用于任何呈现非均质分布的孔径系统，其适用性由孔隙分布本身的多重标度特性决定，与孔径的绝对大小无直接关联，因此被应用于煤页岩孔隙结构[23-24]、煤岩力学-声学-电学性质演化[25]、矿井瓦斯地质规律预测[26]等方面。

浅部煤储层孔隙结构多重分形特征的研究已取得了丰富的成果[23-24, 27-28]。但深部煤层高温高压地层条件下，储层多尺度孔隙结构非均质性特征与浅部煤层的差异尚待深入研究。笔者通过对鄂尔多斯盆地不同煤层气井深部本溪组8#煤样品开展压汞、N_2和CO_2吸附实验，整合实验数据并依据IUPAC孔隙分类方案对深部煤宏孔（> 50 nm）、介孔（2 ~ 50 nm）和微孔（< 2 nm）分布进行联合定量表征，同时利用基于盒计数法的多重分形理论分析深部煤样不同尺度孔隙结构的多重分形特征，表征深部煤样不同尺度孔隙结构非均质性和连通性，探究深部条件对储层孔隙结构非均质特征的影响因素。研究结果对进一步揭示深部煤储层不同尺度孔隙结构非均质性和孔隙连通性差异特征

具有重要意义，有助于深入研究深部煤层气的渗流和运移过程，为认识深部煤层气的保存和富集机理、促进深部煤层气的勘探开发提供依据。

1　样品与方法

1.1　地质概况

鄂尔多斯盆地是在太古宙—古元古代结晶基底之上形成的一个多旋回沉积克拉通盆地。沉积地层发育较全，发育元古界、下古生界、上古生界、中生界及新生界地层。其中，上古生界为一套滨浅海相、海陆过渡相及陆相地层，其构造可分为北部的伊盟隆起和南部的渭北隆起、西部的西缘冲断带、天环坳陷，中部的伊陕斜坡、东部的晋西挠褶带（图 1 a）。区内发育有下二叠统太原组和山西组、上石炭统本溪组 3 套含煤地层，8#煤层位于本溪组顶部，全区稳定发育，厚度 2 ~ 16 m（图 1 b）。宏观煤岩类型以光亮煤、半亮煤为主，区域上自南向北光亮煤占比逐渐增大，半暗煤和暗淡煤占比减少。镜质体反射率在 0. 514% ~ 2. 519% 之间，平均值为 1. 59%，属中高变质阶段的烟煤，变质程度自北而南逐渐增高。显微组分以镜质组为主，惰质组次之，壳质组及矿物组含量较低。

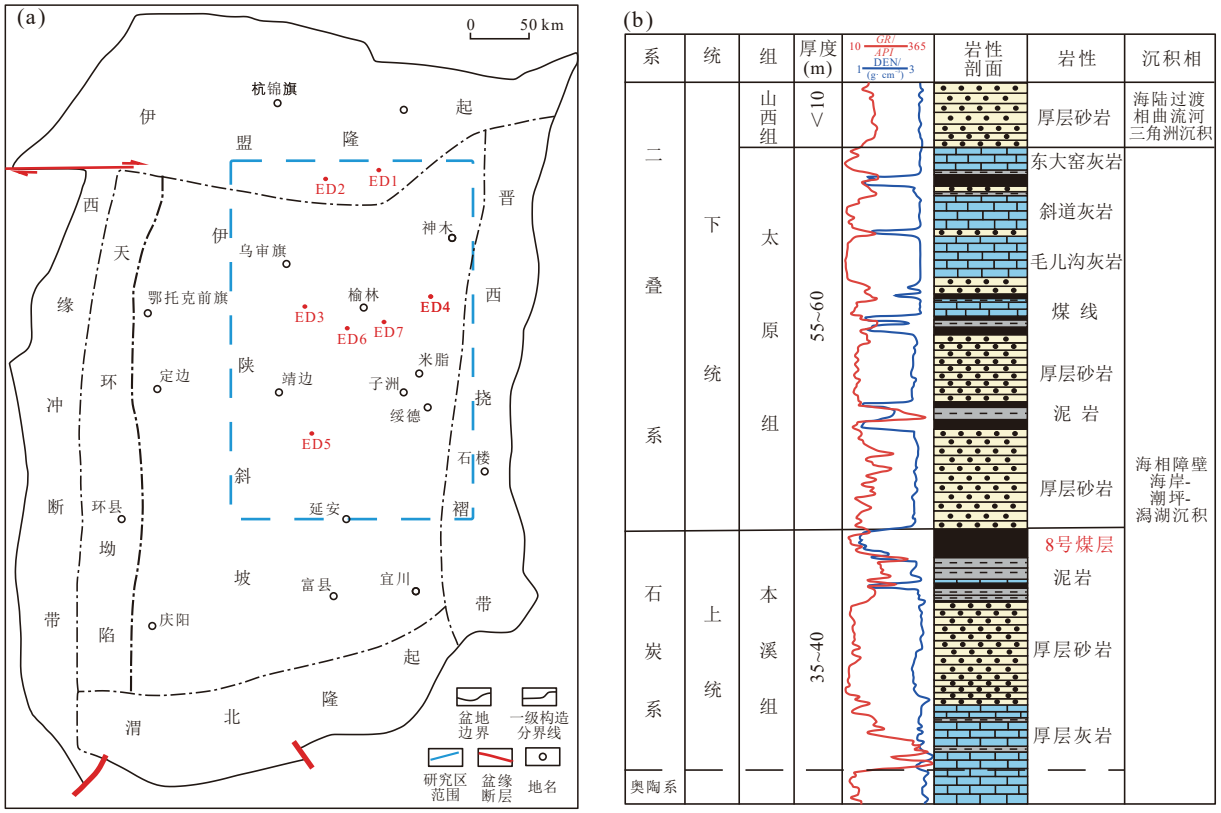


图 1　鄂尔多斯盆地构造纲要（a）及综合柱状图（b）

Fig. 1　Structural outline （a） and comprehensive stratigraphic column （b） of the Ordos Basin

1.2　实验方法

本文测试样品取自鄂尔多斯盆地 ED1、ED2、ED3、ED4、ED5、ED6 和 ED7 等 7 口煤层气井（图 1 a）。依据国家标准《GB/T 212—2008》和《GB/T 15590—2008》对煤样分别进行工业组分和显微组分测试，测试煤样的基本信息见表 1。将煤样研磨至 60 ~ 80 目（0. 18 ~ 0. 25 mm）依据国家标准《GB/T 21650. 3—2011》进行 CO_2 吸附（微孔）、低温 N_2 吸附（介孔）测试，实验温度为 273. 15 K、77 K，实验相对压力为 0. 0001 ~ 0. 0300、0. 001 ~ 0. 998；采用 Density Functional Theory（DFT）模型分析 CO_2 吸附数据获取微孔孔径特征，用 Barrett-Joyner-Halenda（BJH）模型分析 N_2 吸附数据得到介孔孔径特征。将煤样切割为块样（20 mm×20 mm×20 mm）用于高压压汞测试，根据 Washburn 方程计算宏孔孔径特征，联合 CO_2、N_2 吸附及压汞实验数据对样品孔隙进行联合表征。

1.3 多重分形理论

多重分形理论以CO_2、N_2吸附和压汞实验的相对压力或压力区间作为总区间，利用二分法将其划分为N个尺度ε为的区间[21, 29]，具体如下：

$$N(\varepsilon) = 2^{-K} \tag{1}$$

式中，K=1，2，3，4；每个子区间内至少包含一个实验测得的孔体积值。

那么第i个子集中，被定义的概率质量函数p_i（ε）可表示为：

$$p_i(\varepsilon) = m_i(\varepsilon) \Big/ \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} m_i(\varepsilon) \tag{2}$$

式中，m_i（ε）为第i个孔径区间内的累计孔体积占总孔体积的比值。p_i（ε）和ε存在关系如下[28]：

$$\lim_{\varepsilon \to 0} p_i(\varepsilon) \propto \varepsilon^{\alpha_i} \tag{3}$$

式中，α反映变量分布序列的奇异性程度，称为奇异性指数。N_α（ε）为具有同样奇异性指数的子集数量，存在如下关系：

$$N_\varepsilon(\alpha) \propto \varepsilon^{-f(\alpha)} \tag{4}$$

式中，f（α）代表多重分形维度，是具有相同奇异性指数的子集的分形维数。$\alpha - f$（α）构成了多重分形奇异谱，是描述多重分形特征的重要参数体系。$\alpha - f$（α）奇异谱可通过定义配分函数χ（q，ε），表达式如下：

$$\chi(q,\varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} \left[p_i(\varepsilon) \right]^q \tag{5}$$

若变量具有多重分形特征，则有如下关系：

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \to 0} \left[\lg \chi(q,\varepsilon) \Big/ \lg \varepsilon \right] \tag{6}$$

式中，τ（q）为质量标度函数，每一个q值对应一个τ（q）。对于多重分形分布序列而言，非均质性越强，τ（q）与q之间的非线性特征就越显著。通过Legendre变换[30]可得到α（q）和f［α（q）］，具体如下：

$$\alpha(q) = \mathrm{d}\tau(q) / \mathrm{d}q \tag{7}$$

$$f\left[\alpha(q)\right] = q\alpha(q) - \tau(q) \tag{8}$$

一般来说，$\alpha - f$（α）多重分形奇异谱单分形时表现为点，多分形时表现为单峰凸函数[31]。

$q - D$（q）为广义维数谱是描述多重分形行为的另一套参数集。当$q \neq 1$时，存在如下关系：

$$D(q) = \tau(q) \Big/ (q - 1) \tag{9}$$

当$q = 1$时，可通过如下关系计算D（q）：

$$D(1) = \lim_{\varepsilon \to 0} \left[\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon) \lim_{x \to \infty} \lg p_i(\varepsilon) \Big/ \lg \varepsilon \right] \tag{10}$$

特别地，D（1）被称为信息维，D（0）、D（2）分别为容量维和关联维。D（2）可用Hurst指数（H）表示：

$$H = \left[D(2) + 1 \right] / 2 \tag{11}$$

多重分形参数中，H和α（0）用于定量表征孔隙结构非均质性和孔隙连通性。α（0）越大孔径分布差异程度越大，孔隙结构越复杂。H越大表明不同孔径段之间孔隙团的关联性越强，均匀程度越高，孔隙连通性越好[32]。

2 结果与讨论

2.1 煤质特征

测试的深部煤样品埋深介于2063.20 ~ 3109.74 m之间，宏观煤岩类型以半亮煤、光亮煤为主，半暗煤次之；$R_{O,max}$介于1.03% ~ 1.96%之间，平均为1.67%，热演化程度中等，属中高阶煤（表1）。显微组分以镜质组为主，惰质组次之，壳质组含量普遍不高。样品水分较低，介于0.19% ~ 1.48%之间，平均为0.71%；灰分产率差异较大，最低4.61%，最高达32.83%，平均为21.30%；挥发分产率介于9.52% ~ 27.60%之间，

表1 深部煤样品基本信息与煤质特征

Table 1 Basic information, characteristics and coal quality of deep coal samples

序号	样品编号	埋深(m)	宏观煤岩类型	$R_{O,max}$(%)	镜质组(%)	壳质组(%)	惰质组(%)	M_{ad}(%)	A_{ad}(%)	V_{ad}(%)	FC_{ad}(%)
1	ED1-1	2063.20	半亮煤	1.03	73.65	0.62	25.73	0.19	25.21	23.77	50.84
2	ED2-1	2582.10	光亮煤	1.05	76.46	3.22	20.32	0.64	13.91	27.60	57.85
3	ED3-1	3109.74	半暗煤	1.84	36.02	25.87	38.11	0.69	26.28	10.25	62.78
4	ED4-1	2425.20	半亮煤	1.96	59.26	2.35	38.38	0.48	32.83	15.57	51.12
5	ED4-2	2430.25	半亮煤	1.89	53.06	4.42	42.52	0.66	32.17	21.93	45.24
6	ED5-1	2746.10	光亮煤	1.92	86.27	1.02	12.70	1.48	7.20	9.52	81.80
7	ED6-1	2672.75	半亮煤	1.81	65.91	1.23	32.85	1.08	7.47	13.07	78.38
8	ED7-1	2675.68	光亮煤	1.82	80.20	1.22	18.57	0.47	4.61	11.69	83.23

注：$R_{o,max}$为最大镜质体反射率；M_{ad}为水分，A_{ad}为灰分产率，V_{ad}为挥发分分产率，FC_{ad}为固定碳。

平均为16.68%；固定碳介于45.24%～83.23%之间，平均为63.91%，含量较高。

2.2　低温CO_2吸附

各样品吸附等温线形态基本相似（图2），根据IUPAC分类标准[33-34]，均属Ⅰ型吸附等温线。样品间最大吸附量差别明显，ED3-1、ED4-1、ED5-1、ED7-1、ED6-1最大吸附量显著高于其余样品，表明其微孔较其余样品发育。煤样累计孔体积曲线形态总体一致（图4 a），吸附量在0.30～0.36 nm之间少量增长，在0.44～0.69 nm之间快速增长。微孔孔径分布曲线呈双峰形态（图4 b），首峰在0.3~0.4 nm，峰区较窄，主峰在0.5～0.8 nm，峰区较宽，是微孔的主要孔径分布范围。

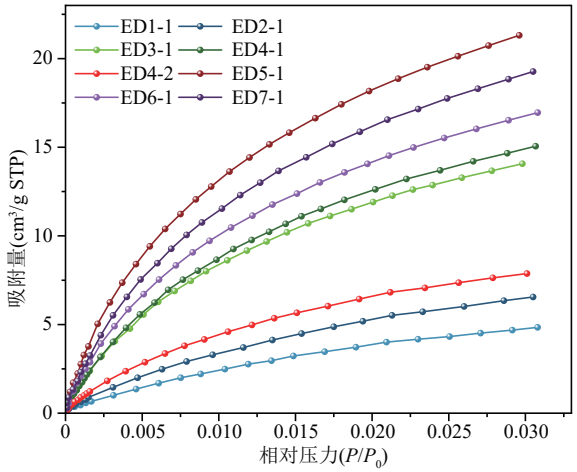


图2　深部煤样品低温CO_2吸附曲线

Fig. 2　Low-temperature CO_2 adsorption curve of deep coal samples

2.3　低温N_2吸附

煤样的低温N_2吸附等温线呈反“S”形态，属Ⅳ型吸附等温线（图3），其中ED4-2、ED5-1、ED6-1、ED7-1属于Ⅳ（a）型，ED1-1、ED2-1、ED3-1、ED4-1属于Ⅳ（b）型[33-34]。在超低压区（$P/P_0<0.02$），微孔填充导致吸附量急剧上升[23]；在低压区（$0.02<P/P_0<0.30$），分子单层吸附开始发生，曲线增长较平缓与Ⅰ型等温线特征相符；在中压区（$0.30<P/P_0<0.95$），吸附量持续增加且增长速率逐渐变快，表明单分子层吸附逐渐向多分子层吸附转变。在高压区（$0.95<P/P_0$），吸附量仍然快速上升，表明相应孔隙中发生毛细凝结。

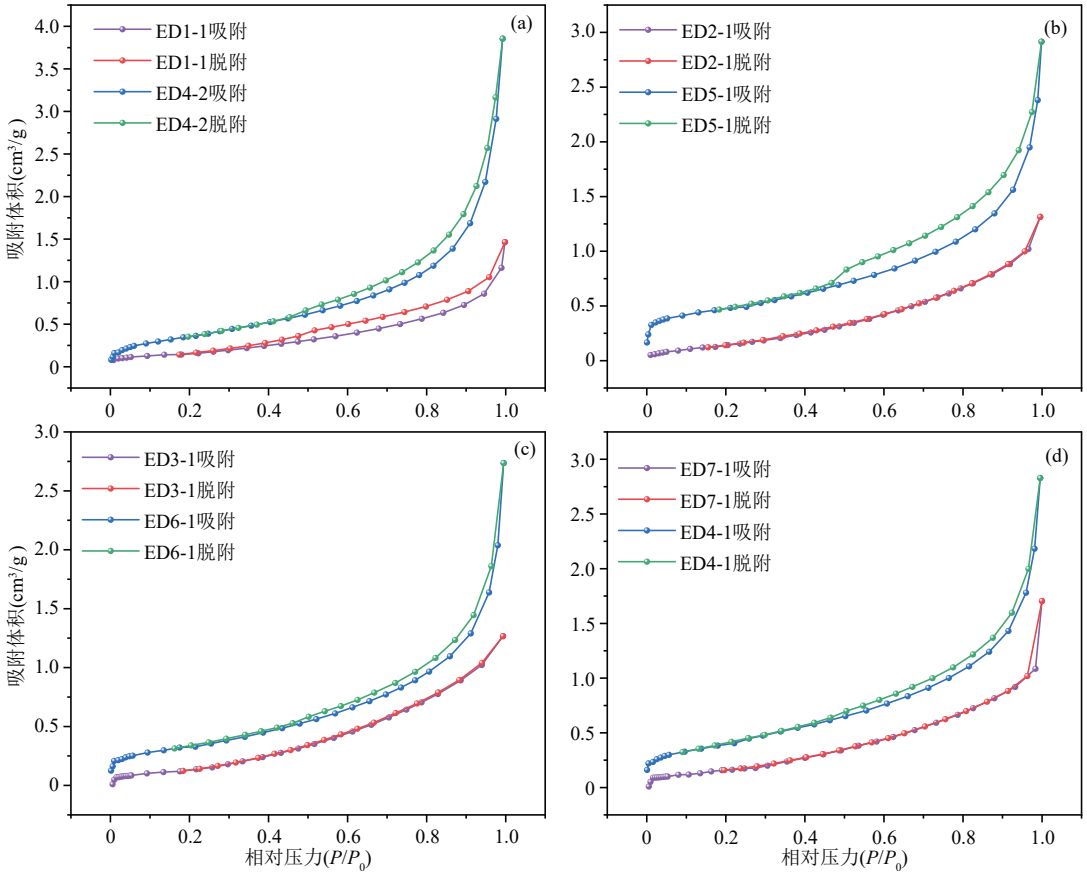


图3　深部煤样品低温N_2吸（脱）附曲线

Fig. 3 Low-temperature N_2 adsorption （desorption） curve of deep coal sample

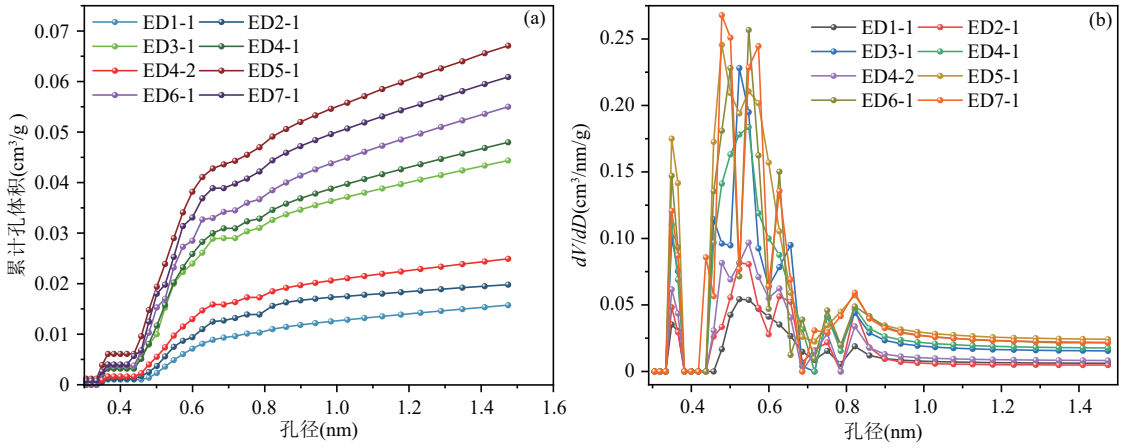


图4 深部煤低温CO_2孔隙累计孔体积曲线（a）孔径分布曲线（b）

Fig. 4 Low-temperature CO_2 porosity Cumulative pore volume curve （a） pore size distribution curve of deep coal samples （b）

ED1-1、ED4-2、ED5-1、ED6-1、ED7-1滞回环属H4型[33-34]，在高压段部分具有H3型特征，表明样品介孔以平板狭缝结构、裂缝和楔形结构为主；ED2-1、ED3-1、ED4-1样品滞回环接近于无，属H1型，显示孔隙为两端开口的管径分布均匀的圆筒状孔。DFT模型计算得到的孔径分布曲线（图5 b）为单峰型态，主峰分布在3 ~ 11 nm区间，累计孔体积曲线表现为先快后慢的增长趋势（图5 a）。

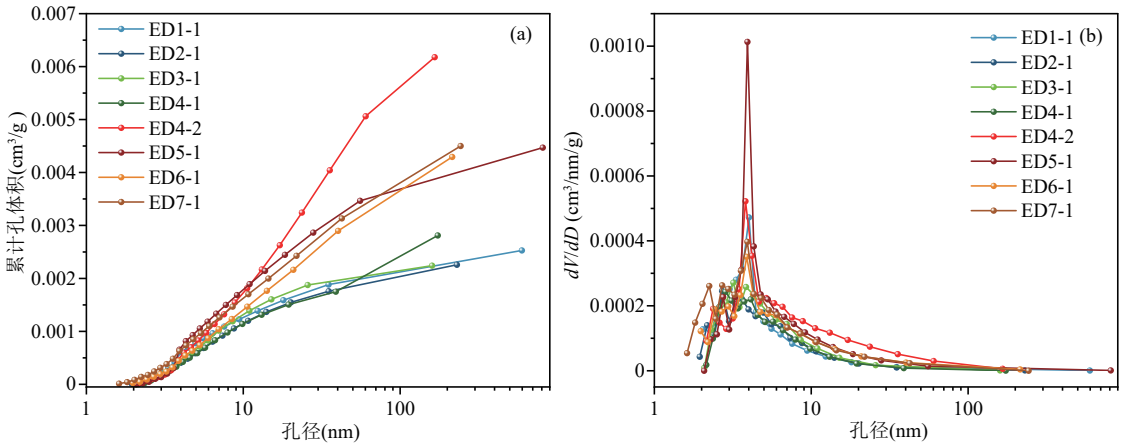


图5 深部煤样品低温N_2孔隙累计孔体积曲线（a）孔径分布曲线（b）

Fig. 5 The low temperature N_2 desorption cumulative pore volume curve （a） and the pore size distribution curve （b） of deep coal samples

2.4 高压压汞

煤样的压力-汞饱和度曲线（图6）差异明显，整体可分为两种类型。ED1-1、ED4-1、ED4-2等煤样压汞曲线可分为三个阶段（图6 a），在低压阶段< 0.1 MPa （ED1-1）、< 1 MPa （ED4-1、ED4-2）曲线近乎垂直，进汞明显，表明样品宏孔或裂隙发育，连通性好；在中等压力阶段0.1 ~ 30 MPa （ED1-1）、1 ~ 30 MPa （ED4-1、ED4-2）曲线近乎平直，进汞量接近于无，表明中孔基本不发育；在高压阶段> 30 MPa曲线近乎垂直，进汞量陡增，表明介孔和微孔发育。ED2-1、ED3-1、ED5-1、ED6-1、ED7-1等煤样的压汞曲线可分为两个阶段，在压力< 10 MPa，曲线缓和，进汞量接近于无，表明样品大孔和裂隙不发育；当压裂> 10 MPa时曲线近似90°直线上升，进汞量激增，表明样品介孔和微孔发育。

从退汞曲线来看，所有样品均不同程度存在滞回环。其中ED2-1、ED4-1、ED4-2进退汞曲线开口较大且基本不重合，表明煤样以开放孔为主、连通性较好；ED3-1进退汞曲线在高中压阶段（> 4 MPa）近似重合，在低压阶段（< 4 MPa）滞后现象明显，表明除宏孔和裂隙外，其余孔隙连通

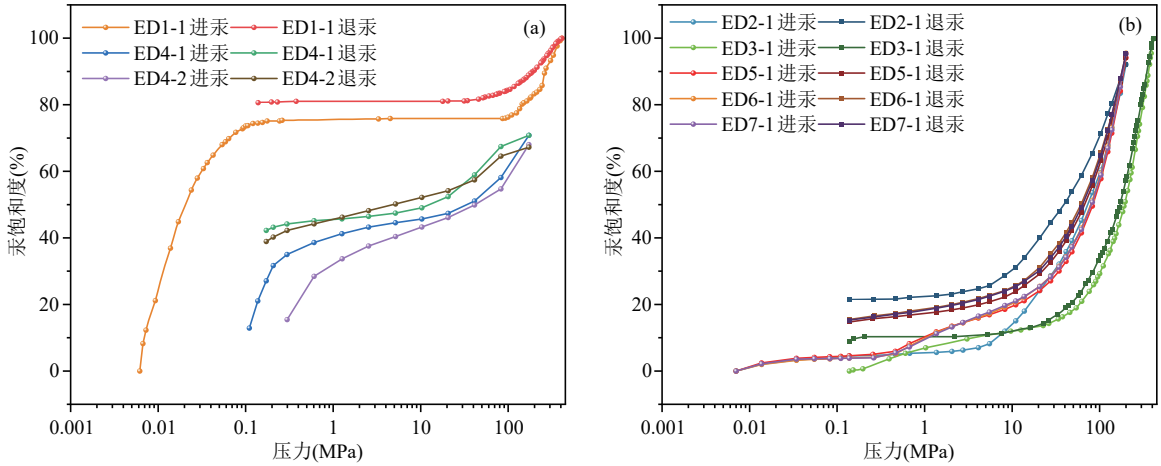


图 6　深部煤样品压汞压力-饱和度曲线

Fig. 6　Mercury pressure-saturation curve of deep coal samples

性较差，以半开放孔为主；ED1-1、ED5-1、ED6-1、ED7-1 滞回环存在但较小，仅在高压阶段近似重合，表明微孔连通性差，中大孔连通性较好。由压汞孔径分布曲线（图 7）知，所有样品的微孔较发育，介孔不发育，ED1-1、ED4-1、ED4-2 宏孔发育，ED1-1 样品宏孔发育程度最好，其余样品宏孔不发育。

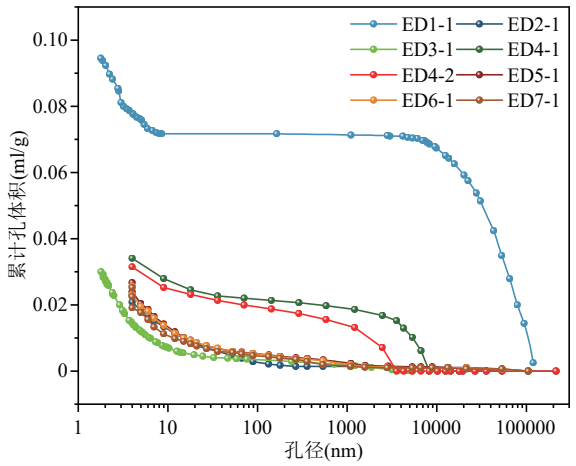


图 7　深部煤样品压汞孔隙累计孔体积曲线

Fig. 7　Cumulative pore volume curve of mercury intrusion porosimetry of deep coal samples

2.5　全孔径分布特征

通过截取压汞法（宏孔）、低温 N_2 吸附（介孔）、CO_2 吸附（微孔）优势孔径段的测试结果进行拼接的方法，对深部煤孔隙发育特征进行全孔径精准表征（表 2，图 8）。总体来看，除 ED1-1 以宏孔发育为主，占比达 80% 外，其余样品均微孔最发育，宏孔、介孔次之。除 ED3-1 外，其余样品宏孔占比均大于介孔，特别是 ED4-1、ED4-2。

表 2　深部煤样品全孔径孔体积分布特征

Table 2　The pore volume distribution characteristics of deep coal samples with full scale

样品	孔体积(cm³/g)				体积占比(%)		
名称	总孔	微孔	介孔	宏孔	微孔	介孔	宏孔
ED1-1	0.08940	0.01575	0.00195	0.07170	17.62	2.18	80.20
ED2-1	0.02622	0.01980	0.00183	0.00459	75.51	6.98	17.51
ED3-1	0.04642	0.04437	0.00204	0.00001	95.58	4.39	0.02
ED4-1	0.07195	0.04798	0.00194	0.02203	66.69	2.70	30.62
ED4-2	0.04957	0.02492	0.00469	0.01996	50.27	9.46	40.27
ED5-1	0.07644	0.06710	0.00340	0.00594	87.78	4.45	7.77
ED6-1	0.06402	0.05500	0.00308	0.00594	85.91	4.81	9.28
ED7-1	0.06894	0.06090	0.00328	0.00476	88.34	4.76	6.90

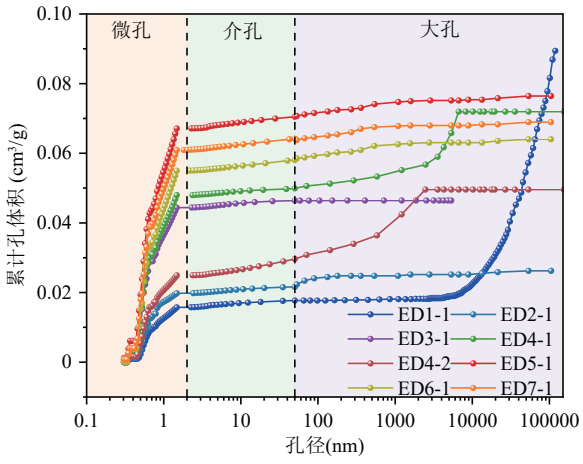


图 8　深部煤全孔径累计孔体积曲线

Fig. 8　Cumulative pore volume curve of deep coal with full scale

由全孔径孔体积分布曲线（图 9），微孔孔径分布优势段为 0.3 ~ 0.4 nm、0.4 ~ 0.8 nm；介孔孔径分布优势段为 3 ~ 11 nm；宏孔分布近似单调递减，孔径优势段 50 ~ 100 nm。

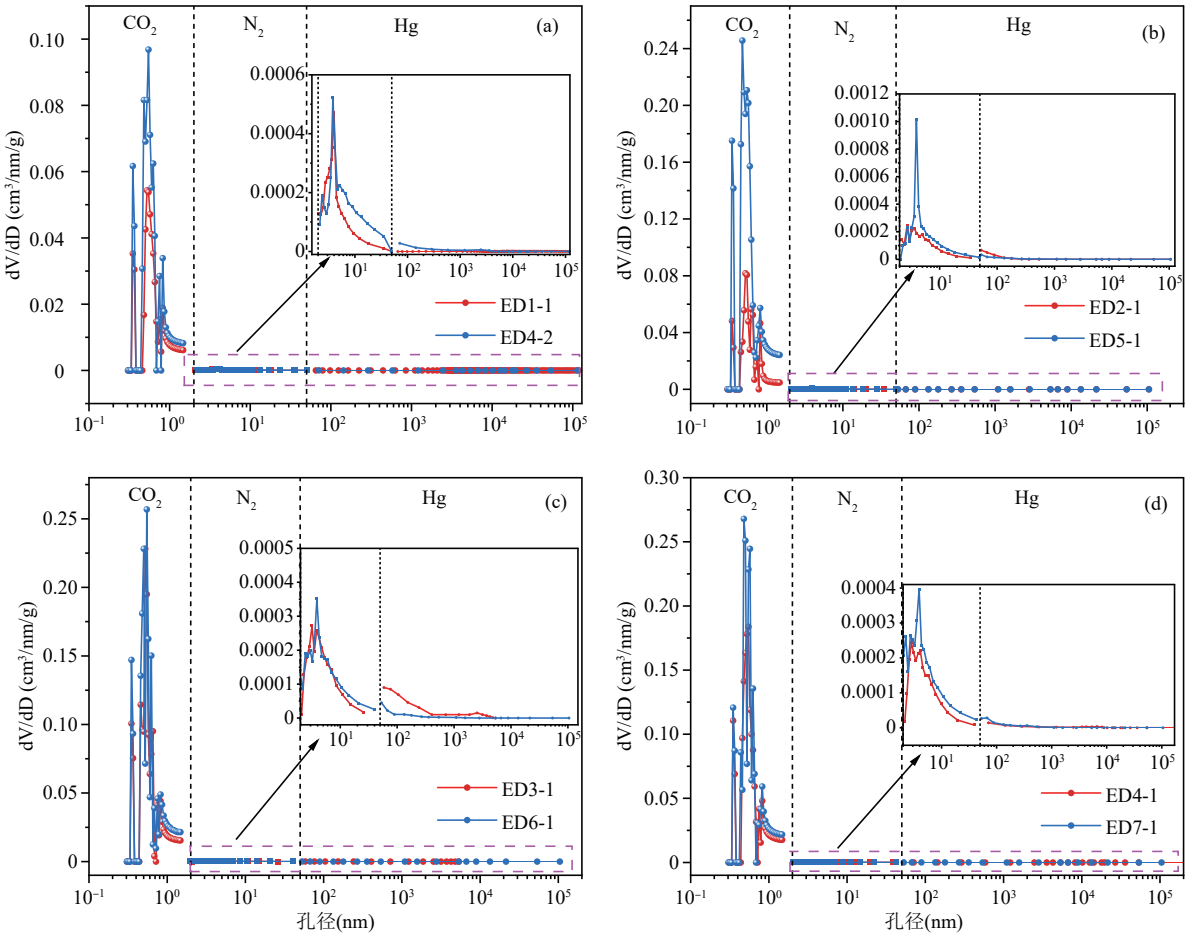


图9 深部煤样全孔径孔体积分布曲线

Fig. 9 Volume distribution curve of deep coal with full scale

3 讨 论

3.1 微孔结构多重分形特征

基于CO_2吸附测试数据表征微孔多重分形特征，样品的$\lg\chi(q,\varepsilon)$-$\log\varepsilon$双对数曲线表现出显著的线性相关性[35]，当$q<0$，配分函数拟合曲线斜率为负；当$q>0$，配分函数拟合曲线斜率为正（图10），表明深部煤微孔孔径分布具有多重分形特征。质量标度函数$\tau(q)$与统计矩阶q呈单增上凸的非线性变化（图11 a），且在$q=0$两侧表现出明显的斜率变化，进一步表明微孔孔径分布的非均质性。

多重分形广义维谱$D(q)-q$（图11 b）呈单调递减的反“S”形，且曲线斜率随q的增大而逐渐减小。$D(q)$的取值分别表征了孔径分布的不同特征：$q>0$时，它对应高概率（集中）的孔径区间；$q<0$时，则对应低概率（分散）的孔径区间[18]。

广义维数谱的定量特征参数如表3，容量维数$D(0)$均为1，表明每个孔隙子区间均有孔隙体积数据分布。信息维$D(1)$介于0.890 ~ 0.955之间，关联维$D(2)$介于0.805 ~ 0.915之间。$D(0)-D(1)$值提供了孔径分布的分散程度信息[36-38]，其值越大，孔径分布均匀性越低，而团聚性越强。微孔的$D(0)-D(1)$值介于0.045 ~ 0.110之间，表明微孔分布较均匀，团聚性较低。一般来说，H（Hurst指数）值越大表明孔隙间连通性越强，微孔H值介于0.893 ~ 0.957间，表明微孔连通性较好。ΔD为$D(-10)$与$D(10)$的差，表示广义维数谱的弯曲程度。微孔ΔD值介于0.477 ~ 0.801之间，表明微孔结构的变异性不强。

深部样品微孔的多重分形奇异谱均表现为上凸的抛物线（图11 c），与二次函数拟合的R^2均大于0.96，其关键特征参数如表4所列。其中，$\Delta\alpha=\alpha(-10)-\alpha(10)$，可以用来表征孔隙结构的非均质性，其值越大，非均质性越强。$W_L=\alpha(0)-$

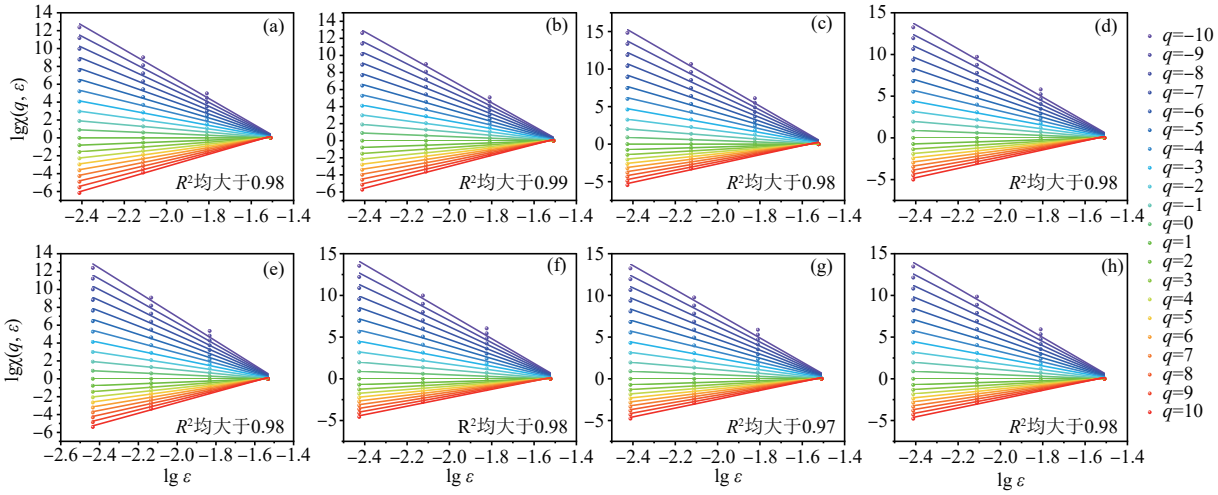


图 10　深部煤样品微孔配分函数χ（q，ε）与测度ε双对数关系图

Fig. 10　Double logarithmic relationship graph between the micropore partition function $\chi(q, \varepsilon)$ and the measure ε of deep coal samples

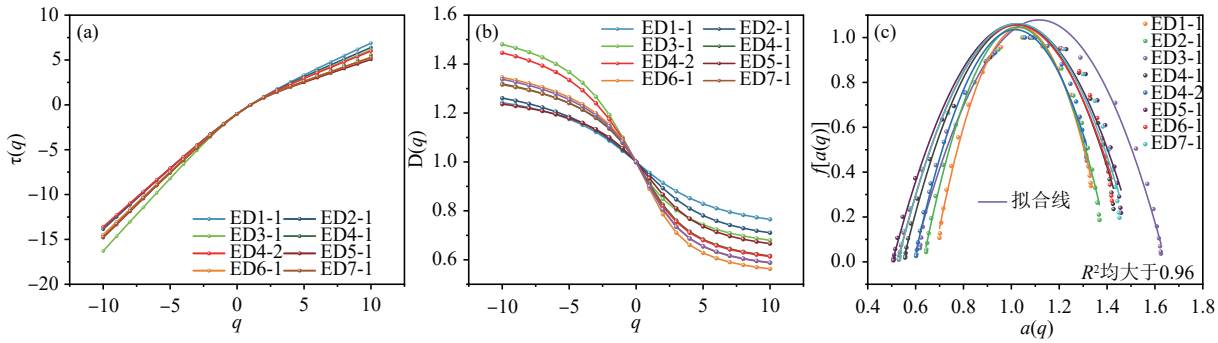


图 11　基于CO_2吸附数据的深部煤样微孔结构多重分形特征：质量标度函数τ（q）与统计矩阶q的关系曲线（a）、多重分形广义维谱D（q）－q（b）及多重分形奇异谱f［α（q）］－α（q）（c）

Fig. 11　Multifractal characteristics of microporous structure in deep coal samples based on CO_2 adsorption data: the relationship curve between the mass scale function $\tau(q)$ and the statistical moment order q (a), Multifractal generalized dimension spectrum $D(q) - q$ (b) and Multifractal singular spectrum f [$\alpha(q)$] $- \alpha(q)$ (c)

表 3　深部煤样品微孔广义维数谱关键特征参数

Table 3　Key characteristic parameters of the generalized dimension spectrum of micropores in deep coal samples

样品编号	$D(0)$	$D(1)$	$D(2)$	H	$D(-10)$	$D(10)$	$D(0)-D(1)$	ΔD
ED1-1	1	0.955	0.915	0.957	1.242	0.765	0.045	0.477
ED2-1	1	0.946	0.893	0.946	1.261	0.710	0.054	0.551
ED3-1	1	0.913	0.849	0.924	1.481	0.680	0.087	0.801
ED4-1	1	0.910	0.825	0.913	1.319	0.616	0.090	0.703
ED4-2	1	0.933	0.866	0.933	1.236	0.666	0.067	0.571
ED5-1	1	0.890	0.786	0.893	1.346	0.563	0.110	0.783
ED6-1	1	0.901	0.807	0.903	1.316	0.588	0.099	0.729
ED7-1	1	0.900	0.805	0.903	1.338	0.589	0.100	0.749

α（10）、W_R=α（−10）－α（0）分别代表奇异谱的左、右分支孔体积分散分布特征；W_L/W_R表示奇异谱的对称性，＞1时奇异谱左偏，孔隙以集中分布为主，反之孔隙以分散分布为主。Δf=f［α（10）］－f［α（−10）］表示孔分布的主导特征，＞0表示孔径分布受低概率密度区影响，反之受高概率区影响。微孔奇异指数α介于1.045 ~ 1.100间，平均1.073；$\Delta\alpha$介于0.633 ~

表 4 深部煤样品微孔多重分形奇异谱的关键特征参数

Table 4 Key characteristic parameters of the multifractal singular spectrum of micropores in deep coal samples

样品编号	$\alpha(0)$	α (10)	α (−10)	$\Delta\alpha$	W_L	W_R	W_L/W_R	Δf
ED1−1	1.045	0.699	1.333	0.633	0.346	0.287	1.204	−0.232
ED2−1	1.058	0.613	1.343	0.730	0.445	0.286	1.558	−0.292
ED3−1	1.100	0.618	1.625	1.007	0.482	0.525	0.917	0.025
ED4−1	1.077	0.556	1.427	0.871	0.521	0.350	1.489	−0.217
ED4−2	1.057	0.602	1.315	0.713	0.455	0.258	1.762	−0.425
ED5−1	1.089	0.507	1.458	0.951	0.582	0.370	1.574	−0.212
ED6−1	1.081	0.530	1.421	0.891	0.551	0.340	1.620	−0.263
ED7−1	1.081	0.530	1.421	0.891	0.551	0.340	1.620	−0.263

1.007，表明微孔非均质性较弱；W_L/W_R除 ED3−1 外均大于 1，表明除 ED3−1 样品孔隙以分散分布为主外，其余样品孔隙以集中分布为主。Δf除 ED3−1 外均为负，表明除 ED3−1 样品外样品微孔分布受高概率密度区主导。

3.2 介孔结构多重分形特征

与微孔相似，基于低温 N_2 吸附得到的介孔 $log\,\chi(q,\varepsilon)-log\,\varepsilon$ 双对数曲线同样表现为显著的线性相关关系（图 12），表明二者存在幂律关系；$\tau(q)-q$ 也同样显示出明显非线性特征（图 13 a），表明介孔分布同样存在多重分形特征。深部煤介孔广义维数谱（图 13 b）也呈反“S”形态，曲线斜率亦随 q 的增大而逐渐减小。其特征参数如表 5 所示，$D(0)$ 均为 1，$D(1)$ 介于 0.727 ~ 0.950 间，$D(2)$ 介于 0.523 ~ 0.907 间。$D(0)-D(1)$ 介于 0.050 ~ 0.273 间，表明深部煤样介孔分布均匀。H 值介于 0.761 ~ 0.954，平均值 0.864，表明介孔连通性较微孔弱。ΔD 介于 0.561 ~ 1.188 间，变异性较微孔强。

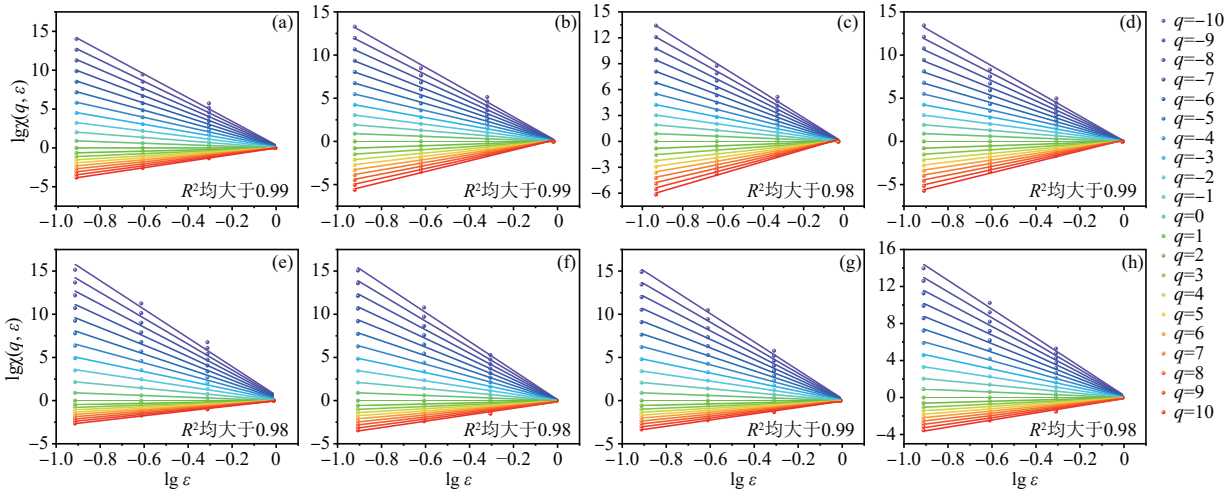


图 12 介孔配分函数 $\chi(q,\varepsilon)$ 与测度 ε 双对数关系图

Fig. 12 The double logarithmic relationship graph between the mesoporous partition function $\chi(q,\varepsilon)$ and the measure ε

介孔多重分形奇异谱也表现为上凸抛物线（图 13 c），与二次函数拟合相关性较好。奇异谱谱宽（表 6）$\Delta\alpha$ 介于 0.722 ~ 1.336 间，非均质性较微孔强，Δf除 ED3−1 外均为负，表明除 ED3−1 样品外介孔分布受高概率密度区主导。W_L/W_R除 ED3−1 外均大于 1，表明除 ED3−1 样品外介孔以集中分布为主。

3.3 宏孔结构多重分形特征

与微孔、介孔相似，高压压汞测试得到的宏孔 $\lg\chi(q,\varepsilon)-\lg\varepsilon$ 双对数曲线同样表现为显著的线性相关关系（图 14），且在 $q>0$ 阶段拟合线极其稠密，表明宏孔分布较为集中。$\tau(q)-q$ 同样显示出明显非线性特征（图 15a），表明宏孔分布也存在多重分形特征。广义维数谱（图 15b）除 ED7−1 反“S”特征不明显外，其余样品该特征较明显，$D(q)$ 随 q 的增大而逐渐减小。$D(0)$ 均为 1，$D(1)$ 介于 0.242 ~ 0.983 间，$D(2)$ 介于 0.100 ~ 0.963 间。$D(0)-D(1)$ 介于 0.017 ~ 0.758 间，变化幅度较大，表明深部煤样宏孔的均匀性及团聚性变化差别较大。H 值介于 0.550 ~ 0.981，平均值 0.724，表明宏孔连通性较微孔、介孔弱。ΔD 介于 0.242 ~ 2.122 间，变异性最强。

宏孔多重分形奇异谱同样表现为上凸抛物线（图 15 c），与二次函数拟合相关性较好。奇异谱谱宽 $\Delta\alpha$ 介于 0.891 ~ 2.373 间（表 8），非均质性

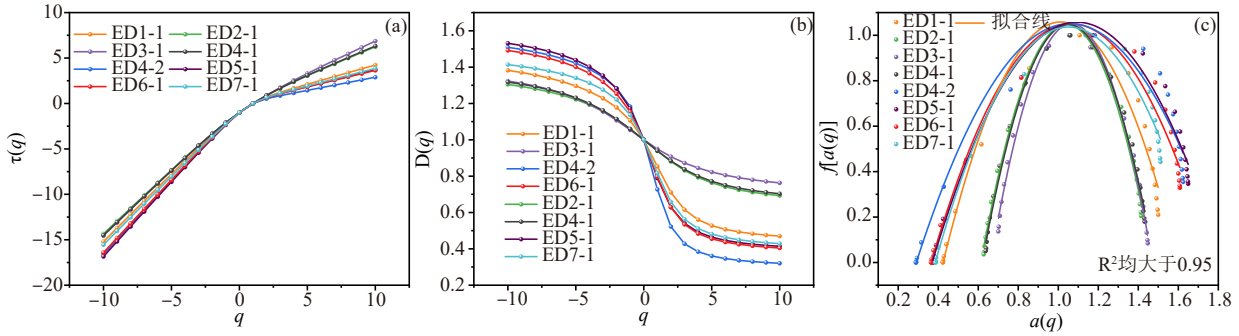


图 13　基于 N_2 吸附数据的深部煤样介孔结构多重分形特征：质量标度函数 τ（q）与统计矩阶 q 的关系曲线（a）、多重分形广义维谱 D（q）- q（b）及多重分形奇异谱 f［α（q）］-α（q）（c）

Fig. 13　Multifractal characteristics of mesoporous structure in deep coal samples based on N_2 adsorption data: the relationship curve between the mass scale function τ (q) and the statistical moment order q (a), multifractal generalized dimension spectrum D (q) – q (b) and multifractal singular spectrum f [α (q)]–α (q)(c)

表 5　深部煤样品介孔广义维数谱关键特征参数

Table 5　Key characteristic parameters of mesoporous generalized dimension spectra for deep coal samples

样品编号	D (0)	D (1)	D (2)	H	D (−10)	D (10)	D (0) – D (1)	ΔD
ED1−1	1	0.853	0.711	0.855	1.382	0.470	0.147	0.912
ED2−1	1	0.938	0.880	0.940	1.305	0.693	0.062	0.612
ED3−1	1	0.950	0.907	0.954	1.324	0.763	0.050	0.561
ED4−1	1	0.940	0.884	0.942	1.318	0.703	0.060	0.615
ED4−2	1	0.727	0.523	0.761	1.509	0.321	0.273	1.188
ED5−1	1	0.789	0.629	0.815	1.531	0.414	0.211	1.117
ED6−1	1	0.797	0.629	0.815	1.492	0.405	0.203	1.087
ED7−1	1	0.816	0.658	0.829	1.414	0.429	0.184	0.985

表 6　深部煤样品介孔多重分形奇异谱的关键特征参数

Table 6　Key characteristic parameters of mesoporous multifractal singular spectra for deep coal samples

样品编号	α (0)	α (10)	α (−10)	$\Delta\alpha$	W_L	W_R	W_L/W_R	Δf
ED1−1	1.107	0.423	1.499	1.076	0.684	0.393	1.741	−0.210
ED2−1	1.056	0.602	1.324	0.722	0.454	0.268	1.697	−0.411
ED3−1	1.054	0.700	1.447	0.747	0.354	0.393	0.900	−0.052
ED4−1	1.060	0.638	1.431	0.794	0.422	0.372	1.136	−0.129
ED4−2	1.183	0.289	1.624	1.336	0.894	0.441	2.026	−0.354
ED5−1	1.172	0.373	1.649	1.277	0.799	0.478	1.673	−0.346
ED6−1	1.089	0.507	1.458	0.951	0.582	0.370	1.574	−0.212
ED7−1	1.081	0.530	1.421	0.891	0.551	0.340	1.620	−0.263

较微孔、介孔强，Δf 均为负，表明样品宏孔分布受高概率密度区主导。W_L/W_R 均大于 1，表明样品宏孔以集中分布为主。

3.4　非均质性影响因素分析

孔体积及体积分数与压力关系曲线（图 16）显示，总孔和宏孔的体积及体积分数随埋深增加而降低；微孔则反之，随埋深增加而增加；介孔随埋深变化不大。表明深部地层条件下，随着埋深的增加温度、压力、地应力升高，宏孔体积变化受压力主导发生闭合，煤基质变得更加紧密。微孔因吸附及微孔填充效应含有大量的气体分子，孔内气体受热膨胀或水分蒸发，导致孔体积增加。介孔不发育，故受影响较小。

选取 $\Delta\alpha$（孔隙非均质性参数）和 H（孔隙连通性参数）[22] 对不同类型孔隙非均质性进行比较（图 17），微孔 $\Delta\alpha$ 总体最小，宏孔最大，介孔居

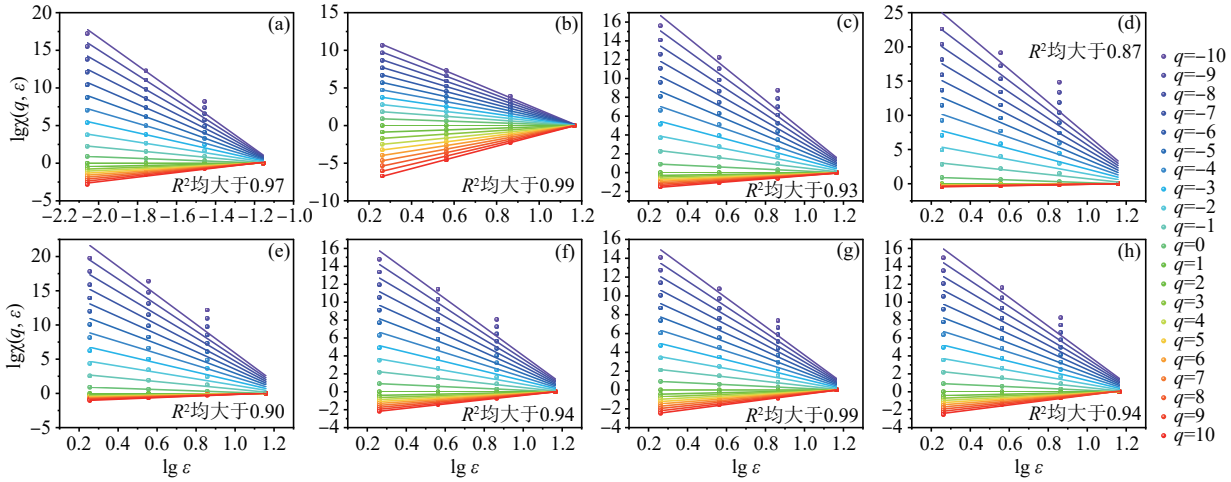


图 14 宏孔配分函数 χ（q，ε）与测度 ε 双对数关系图

Fig. 14 The double logarithmic relationship graph between the macroporous partition function χ （q，ε） and the measure ε.

表 7 深部煤样品宏孔广义维数谱关键特征参数

Table 7 Key characteristic parameters of macroporous generalized dimension spectra for deep coal samples

样品编号	$D(0)$	$D(1)$	$D(2)$	H	$D(-10)$	$D(10)$	$D(0)-D(1)$	ΔD
ED1−1	1	0.715	0.532	0.766	1.683	0.340	0.285	1.342
ED2−1	1	0.983	0.963	0.981	1.068	0.827	0.017	0.242
ED3−1	1	0.558	0.320	0.660	1.519	0.185	0.442	1.335
ED4−1	1	0.242	0.100	0.550	2.178	0.056	0.758	2.122
ED4−2	1	0.428	0.225	0.612	1.918	0.129	0.572	1.789
ED5−1	1	0.673	0.446	0.723	1.441	0.267	0.328	1.175
ED6−1	1	0.713	0.495	0.748	1.378	0.300	0.287	1.079
ED7−1	1	0.700	0.496	0.748	1.455	0.308	0.300	1.148

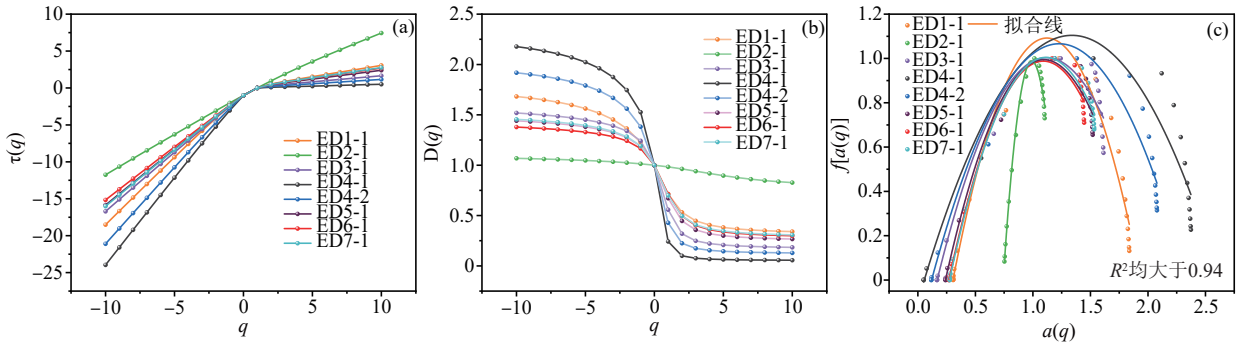


图 15 基于高压压汞数据的深部煤样宏孔结构多重分形特征：质量标度函数 τ（q）与统计矩阶 q 的关系曲线（a）、多重分形广义维谱 D（q）$-q$（b）及多重分形奇异谱 f［α（q）］$-\alpha$（q）（c）

Fig. 15 Multifractal characteristics of macroporous structure of deep coal samples based on high-pressure mercury pressure data: Relationship curve between the mass scale function τ (q) and the statistical moment order q (a), Multifractal generalized dimension spectrum D (q) − q (b) and Multifractal singular spectrum f [α (q)]−α (q) (c)

中，表明深部煤样宏孔非均质最强，微孔最弱。H 值总体来看微孔最大，宏孔最小，介孔居中，表明微孔连通性最好，宏孔最差。由孔体积与不同孔隙非均质性参数的关系图（图 18）可以看出不同类型孔隙 $\Delta\alpha$ 随孔体积增大而增大，H 则反之，且微孔相关性最高，宏孔最小；表明深部煤样孔体积越大，非均质性越强，连通性越差。结合孔体积随埋深的变化规律可知，随着埋深的增加，介孔与宏孔的孔径减小，喉道因塌陷而连通，导致其均一性及连通性增强；而微孔或因内部气体

表 8　深部煤样品宏孔多重分形奇异谱的关键特征参数

Table 8　Key characteristic parameters of macroporous multifractal singular spectra of deep coal samples

样品编号	$\alpha(0)$	α (10)	α (−10)	$\Delta\alpha$	W_L	W_R	W_L/W_R	Δf
ED1−1	1.227	0.306	1.838	1.531	0.920	0.611	1.506	−0.131
ED2−1	1.251	0.214	1.898	1.685	1.037	0.647	1.603	−0.151
ED3−1	1.242	0.166	1.614	1.447	1.076	0.372	2.895	−0.574
ED4−1	1.526	0.051	2.373	2.322	1.476	0.847	1.742	−0.227
ED4−2	1.382	0.116	2.078	1.962	1.265	0.697	1.816	−0.314
ED5−1	1.190	0.240	1.520	1.280	0.950	0.330	2.879	−0.655
ED6−1	1.089	0.507	1.458	0.951	0.582	0.370	1.574	−0.212
ED7−1	1.081	0.530	1.421	0.891	0.551	0.340	1.620	−0.263

受热运动闭合困难，或因部分宏（介孔）体积减小而形成，甚至在基质内部气体分子运动中产生，导致其非均质性增强，连通性降低。

4　结　论

（1）测试煤样平均 $R_{O,\ max}$ 为 1.67%，热演化程度中等，属中高阶煤。显微组分以镜质组为主，平均含量为 66.35%，惰质组平均含量为 28.65%，壳质组普遍含量不高，平均仅为 4.99%。煤样水分普遍较低，平均仅为 0.71%，灰分产率差异较大，最低为 4.61%，最高达 32.83%，挥发分产率平均为 16.68%，固定碳含量较高，平均为 63.91%。

（2）研究区深部煤样微孔孔径分布优势段为 0.3 ~ 0.4 nm、0.4 ~ 0.8 nm，介孔孔径分布优势段为 3 ~ 11 nm，宏孔分布优势段为 50 ~ 100 nm。本溪组 8#煤储层大部分为微孔优势型，微孔占比最高可达 95% 以上，部分表现为微孔−宏孔优势

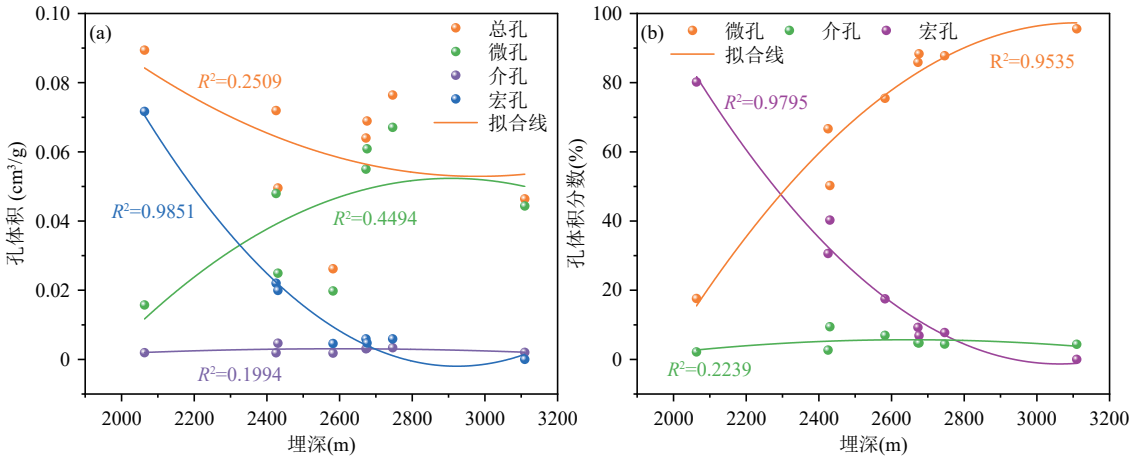


图 16　埋深孔体积关系（a）及孔体积分数关系（b）

Fig. 16　Pore volume vs. burial depth （a）, pore volume fraction vs. burial depth （b）

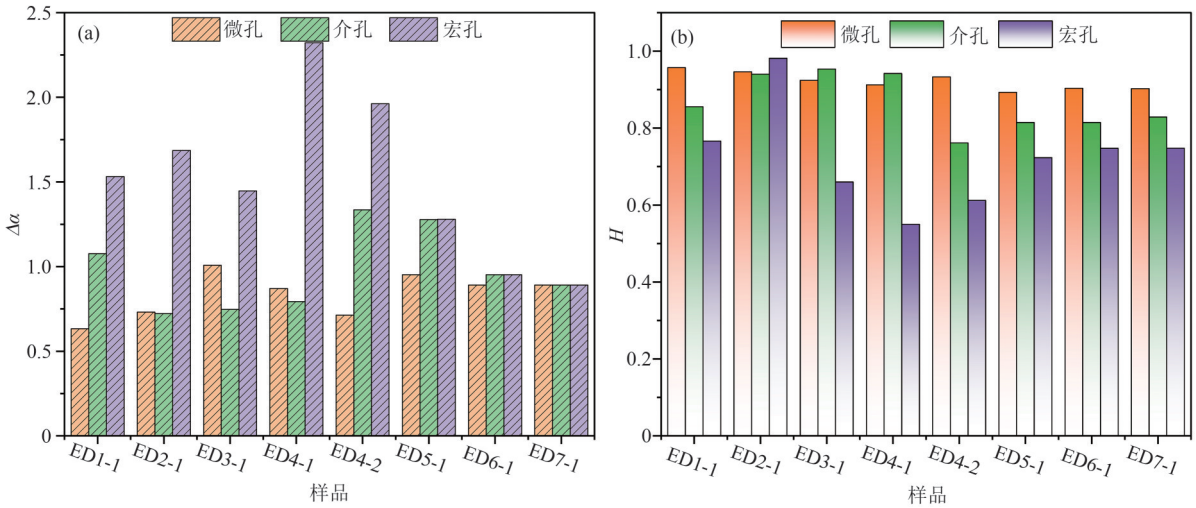


图 17　不同类型孔隙奇异谱宽度 $\Delta\alpha$（a）及 H 指数（b）分布柱状图

Fig. 17　Singularity spectrum width $\Delta\alpha$ and H-index distribution histogram for different pore types

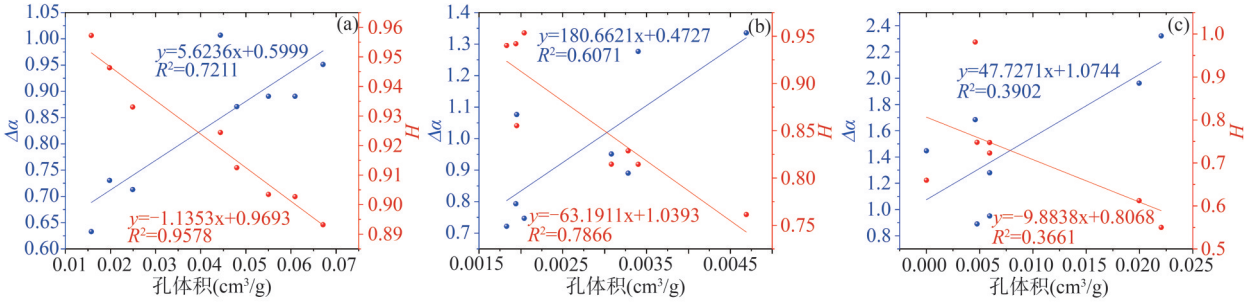


图18 孔体积与不同孔隙非均质性参数的关系（（a）微孔；（b）介孔；（c）宏孔）

Fig. 18 Relationship between pores volume and heterogeneity parameters of different pores: Micropores (a), Mesopores (b), Macropores (c)

型，介孔整体不发育，占比最高不超过10%。随埋深增加，深部煤样微孔体积增加，总孔体积和宏孔体积减少，介孔变化不大。

（3）深部煤样宏孔、介孔、微孔孔径分布均表现出多重分形特征。微孔$\Delta\alpha$整体偏小、H整体偏大，宏孔则反之，表明相较于微孔，宏孔和介孔的孔隙结构非均质性更强、连通性较差。

参考文献：

[1] 贾承造. 中国石油工业上游前景与未来理论技术五大挑战[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 1－14.

[2] 赵文智, 曹正林, 刘运宸, 等. 中国深层煤岩气成藏特征与发展前景展望[J]. 中国石油勘探, 2025, 30(4): 27－43.

[3] 郭旭升, 赵培荣, 申宝剑, 等. 中国深层煤层气地质特征与勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1511－1523.

[4] 鞠玮,陶树,杨兆彪,等. 中国深部煤层气研究与勘探开发现状及其发展趋势[J]. 石油实验地质,2025,47(1):9－16.

[5] 刘洪林, 王怀厂, 黄道军, 等. 鄂尔多斯盆地深部煤岩气储层气孔成因及成藏富集特征[J]. 中国石油勘探, 2025,30(4):92－107.

[6] 付裕, 陈新, 冯中亮. 基于CT扫描的煤岩裂隙特征及其对破坏形态的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 568－578.

[7] 姚艳斌, 刘大锰, 蔡益栋, 等. 基于NMR和X-CT的煤的孔裂隙精细定量表征[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(11): 1598－1607.

[8] 翟成, 孙勇, 范宜仁, 等. 低场核磁共振技术在煤孔隙结构精准表征中的应用与展望[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 828－848.

[9] 李奇, 吴勇, 乔磊. 深部中阶煤孔结构的压汞——液氮联合表征及孔隙分形特征[J]. 石油实验地质, 2025, 47(1): 130－142.

[10] 李琦,陈睿倩,商斐,等. 川东北地区侏罗系凉高山组页岩储层孔隙结构及分形特征[J]. 石油实验地质,2025,47(2): 323－335.

[11] ZHANG J B, HUANG H Z, ZHOU W B, et al. Study on Pore Structure of Tectonically Deformed Coals by Carbon Dioxide Adsorption and Nitrogen Adsorption Methods [J]. Energies, 2025, 18(4): 887.

[12] 王翠霞 ,任棒, 李成柱. 不同变质程度煤体孔隙结构非均质性表征[J]. 煤矿安全, 2021, 52(6): 40－46.

[13] 刘硕, 王飞, 于瑞, 等. 致密砂岩储层微观孔喉结构及其分形特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2024,54(1): 96－107.

[14] 缪欢, 姜振学, 龚训, 等. 川中地区筇竹寺组深层——超深层页岩孔隙结构与分形特征[J]. 现代地质, 2025, 39(5): 1305－1315.

[15] 苏珍, 赵永刚, 苗万春, 等. 基于核磁共振与分形理论的致密砂岩储层分类评价[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(17): 7122－7131.

[16] 姚睿, 李渔刚, 唐春燕, 等. 辽河坳陷古近系混积型页岩油储层孔隙结构与优质储层成因[J]. 现代地质, 2025, 39(6): 1633－1647.

[17] 周雨璇, 胡彪, 等. 低阶煤吸附孔结构特征及其对甲烷吸附性能影响[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 127－136.

[18] FENG G J, LI W, ZHU Y M, et al. Matrix compressibility and multifractal nature of nanoporous shale [J]. Energy & Fuels, 2024, 38(5): 4057－4075.

[19] MARTÍNEZ S J F, MARTÍN A M, CANIEGO J F, et al. Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore structures [J]. Geoderma, 2010, 156(1): 32－42.

[20] CHENG G X, JIANG B, LI M, et al. Quantitative characterization of fracture structure in coal based on image processing and multifractal theory [J]. International Journal of Coal Geology, 2020, 228: 103566.

[21] 谢淑云, 雷蕾, 焦存礼, 等. 鲕粒白云岩内部溶蚀及孔隙非均质性演化研究[J]. 现代地质, 2019, 33(6): 1174－1187.

[22] 魏虎,林进,王香增,等. 鄂尔多斯盆地东南缘深部8#煤储层地质特征及含气性主控因素分析[J]. 现代地质,2025, 39(5): 1316－1331.

[23] 冯光俊, 郑司建, 朱炎铭, 等. 基于多重分形理论的低阶煤孔隙结构非均质性及影响因素研究[J]. 现代地质, 2025, 39(5): 1332－1348.

[24] 张苗, 刘钦节, 王兴阵, 等. 整合压汞、N_2和CO_2吸附的中-高阶煤多重分形特征[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2394－2404.

[25] 金毅,李娅妮,宋慧波,等. 分形界面吸附行为初探[J]. 煤田

地质与勘探,2024,52(5):1 - 11.

[26] 李云波，张腾飞，宋党育，等. 基于多重分形奇异性理论的瓦斯地质规律预测方法——以淮南矿区潘一矿为例[J]. 煤炭学报，2018，43(12)：3436 - 3446.

[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)：3135 - 3144.

[28] 祝汉京，张军建. 基于低场核磁共振技术和多重分形理论的高阶煤样孔裂隙分维特征[J]. 煤炭工程，2024，56(6)：158 - 162.

[29] HALSEY C T，JENSEN H M，KADANOFF P L，et al. Fractal measures and their singularities：The characterization of strange sets[J]. Nuclear Physics B-Proceedings Supplements，1987，2：501 - 511.

[30] CHHABRA A B，MENEVEAU C，JENSEN R V，et al. Direct determination of the f(α) singularity spectrum and its application to fully developed turbulence[J]. Physical Review A，General Physics，1989，40(9)：5284 - 5294.

[31] CANIEGO F. J，MARTI M A，JOSÉ F S. Rényi dimensions of soil pore size distribution[J]. Geoderma，2003，112(3/4)：205 - 216.

[32] KOUQI L，MEHDI O，LINGYUN K. Multifractal characteristics of Longmaxi Shale pore structures by N_2 adsorption：A model comparison[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2018，168：330 - 341.

[33] THOMMES M，KANEKO K，NEIMARK V A，et al. Physisorption of gases，with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report)[J]. Pure and Applied Chemistry，2015，87(9/10)：1051 - 1069.

[34] SING W K S. 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.

[35] HOLMES R，RUPP C E，VISHAL V，et al. Selection of Shale Preparation Protocol and Outgas Procedures for Applications in Low-Pressure Analysis[J]. Energy & Fuels，2017，31(9)：9043 - 9051.

[36] ZHANG YAN，LI ZHIPING，WU HAO. Multifractal analyses on the retention mechanism of fracturing fluid in tight sandstone[J]. Unconventional Resources，2025，7，100209. https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100209.

[37] ZHANG M，DUAN C C，LI G F，et al. Determinations of the multifractal characteristics of the pore structures of low-，middle-，and high-rank coal using high-pressure mercury injection[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering，2021，203：108656.

[38] XIA WENHAO，XI KELAI，XIN HONGGAN，et al. The influence of pore throat heterogeneity and fractal characteristics on reservoir quality：A case study of chang 8 member tight sandstones，Ordos Basin[J]. Unconventional Resources，2025，5：100123. https://doi.org/10.1016/j.uncres.2024.100123.