

武乡区块山西组泥页岩孔隙结构及分形特征研究

曹磊^{1,2}, 郭英海^{3,4}

(1. 江苏地质矿产设计研究院, 江苏 徐州 221006; 2. 中国煤炭地质总局 煤系矿产资源重点实验室, 江苏 徐州 221006;
3. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 4. 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州
221008)

摘要: 沁水盆地东部煤系伴生泥页岩广泛发育, 页岩气资源潜力大, 开展该区泥页岩孔隙结构特征的研究对页岩含气性评价及实现煤层气、页岩气合探共采具有重要意义。本文以盆地内武乡区块 Y 井二叠系山西组泥页岩为研究对象, 通过 XRD、高压压汞和低温液氮吸附等实验手段对泥页岩孔隙结构特征及分形特征进行了研究。结果表明, Y 井山西组泥页岩的矿物组成以黏土矿物和石英为主; 泥页岩中小于 50 nm 的孔隙大量发育, 结构形态上以狭缝平板型孔隙和“细瓶颈”孔隙为主; 泥页岩样品吸附曲线呈倒 S 型, 属于 Brunauer 分类方案中的 II 型曲线, 其脱附曲线属于 IUPAC 分类方案中的 H2 型(兼具 H1 型及 H3 型), 属 De Boer 分类方案中的 B 型(兼具 E 型及 C 型); Y 井山西组泥页岩分形维数接近 3, 非均质性较强, 矿物成分、总孔体积、平均孔径和 TOC 含量是影响泥页岩分形维数的重要因素。

关键词: 沁水盆地; 山西组; 泥页岩; 孔隙结构; 分形特征

中图分类号: P588.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)03-0283-08

Pore structure and fractal characteristics of mud shale in Shanxi Formation of Wuxiang block

CAO Lei^{1,2} and GUO Ying-hai^{3,4}

(1. Jiangsu Institute of Geology and Mineral Design, Xuzhou 221006, China; 2. Key Laboratory of Coal Resources and Mineral Resources, China Coal Geology Bureau, Xuzhou 221006, China; 3. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Coal Seam Key Laboratory of Gas Resources and Accumulation Process, Ministry of Education, Xuzhou 221008, China)

Abstract: The coal-associated mud shale is widely developed in the east of the Qinshui Basin and has great potential for shale gas resources. Research on the pore structure characteristics of mud shale in this area is of great significance for the evaluation of shale gas-bearing properties and the realization of joint exploration and co-production of coalbed methane and shale gas. In this paper, the mud shale of the Permian Shanxi Formation from Well Y in the Wuxiang block of the basin was taken as the research object. The pore structure characteristics and fractal characteristics of the mud shale were studied by means of XRD, high-pressure mercury intrusion, and low-temperature liquid nitrogen adsorption. The results show that the mineral composition of the mud shale of the Shanxi Formation in the Y-well is dominated by clay minerals and quartz. There are a large number of pores smaller than 50 nm, and the pore structure is mainly composed of crack pores and “thin bottleneck” pores. The mud shale adsorption curve is of inverted S-type, suggesting type II curve of Brunauer classification scheme. The desorption line belongs to the

收稿日期: 2019-08-19; 接受日期: 2020-02-28; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 山西省煤基重点科技攻关项目资助(MQ2014-02)

作者简介: 曹磊(1991-), 女, 硕士, 工程师, 矿产普查与勘探专业, E-mail: 2864958258@qq.com。

H2 type (both H1 type and H3 type) in the IUPAC classification scheme, and belongs to the B type (both E type and C type) in the De Boer classification scheme. The fractal dimension of mud shale in Shanxi Formation of Well Y is close to 3, and the heterogeneity is strong. Mineral composition, total pore volume, average pore size and TOC content are important factors affecting the fractal dimension of mud shale.

Key words: Qinshui Basin; Shanxi Formation; mud shale; pore structure; fractal characteristics

Fund support: Key Coal-based Scientific and Technological Projects in Shanxi Province (MQ2014-02)

作为一种新的清洁能源,页岩气越来越受到重视,近几年来,随着国内页岩气研究工作不断成熟以及资源勘探开发工作的不断深入,页岩孔隙特征逐渐成为含气性评价和勘探开发的重要参考依据(Curtis, 2002; 陈跃等, 2018)。一些学者(刘冲等, 2018; 黄兴龙, 2018; 刘家橙等, 2019; 赵帮胜等, 2019)已经针对鄂尔多斯盆地、豫西及鲁西南等地区山西组泥页岩进行了研究,并指出了不同尺度的孔隙分布特征和发育情况。郭英海等(2015)、陈尚斌(2016)、朱炎铭等(2016)等对页岩孔隙类型、形态、孔径分布等进行了初步研究,认为页岩孔隙特征影响着储层的赋存状态和气藏储集能力。

沁水盆地位于山西省东南部,煤系气含量高,是当前中国煤层气开发程度最高的盆地(秦勇等, 2016)。很多学者对页岩气进行了研究(聂海宽等, 2011; 郭英海等, 2015; 朱炎铭等, 2016),并取得一定的成果,但沁水盆地东部海陆过渡相页岩微观孔隙结构特征研究程度相对较低,需要进一步深入研究。本文以沁水盆地武乡区块Y井为切入点,借助XRD、低温液氮吸附和高压压汞等测试,对泥页岩的孔隙结构进行分析,并基于低温液氮吸附的FHH分形模型,探讨孔隙结构非均质性,为研究区泥页岩储层储集能力预测和页岩气勘探提供基础依据。

1 地质背景

沁水盆地地处太行山西麓,属于侵蚀中深区,地形较为复杂,沟谷纵横,切割较为强烈(苏育飞等, 2016)(图1)。盆地北部及东部的泥岩比西部及南部的泥岩分布厚。研究区武乡区块位于沁水盆地中东部,山西组发育泥岩、泥页岩、页岩、砂岩和煤层。根据研究区Y井钻孔资料,山西组(K_7 底~ K_8 底)厚度在37.43~71.46 m之间,平均厚度为46.18 m,泥页岩形成于三角洲分流间湾、泥炭沼泽等沉积环境(田志强, 2016)。

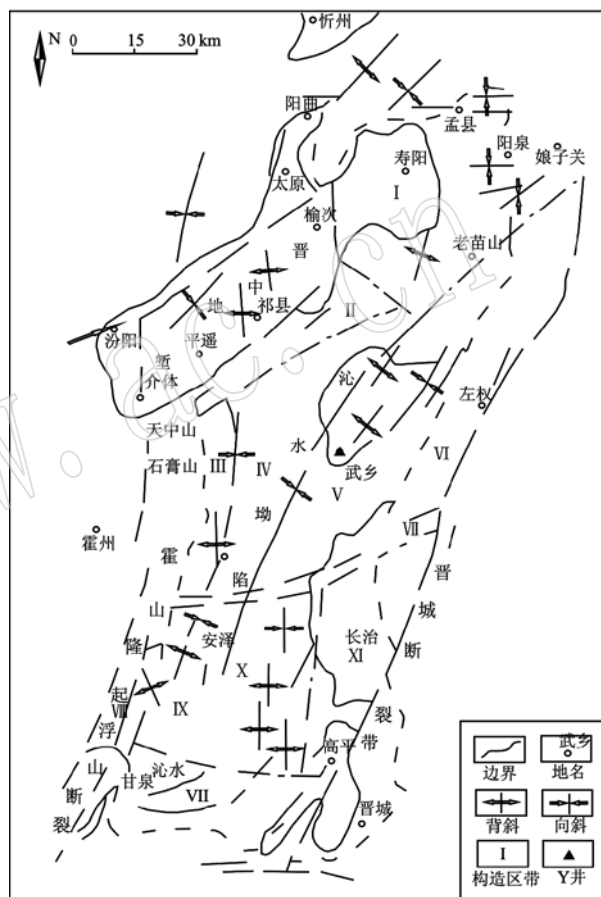


图1 研究区总体构造图

Fig. 1 Overall structure map of the study area

2 样品和实验

样品采自于沁水盆地东部武乡地区Y井,选取山西组4块泥页岩样品为实验对象,样号分别为Y1、Y2、Y3和Y4,采样位置如图2。在岩芯观察的基础上,将泥页岩样品首先磨制成薄片在显微镜下鉴定,初步确定样品岩石学和矿物学特征。用碎样机将样品破碎,筛分至200目以下进行XRD实验,碾磨至40~60目做低温液氮实验,取直径2 cm泥页

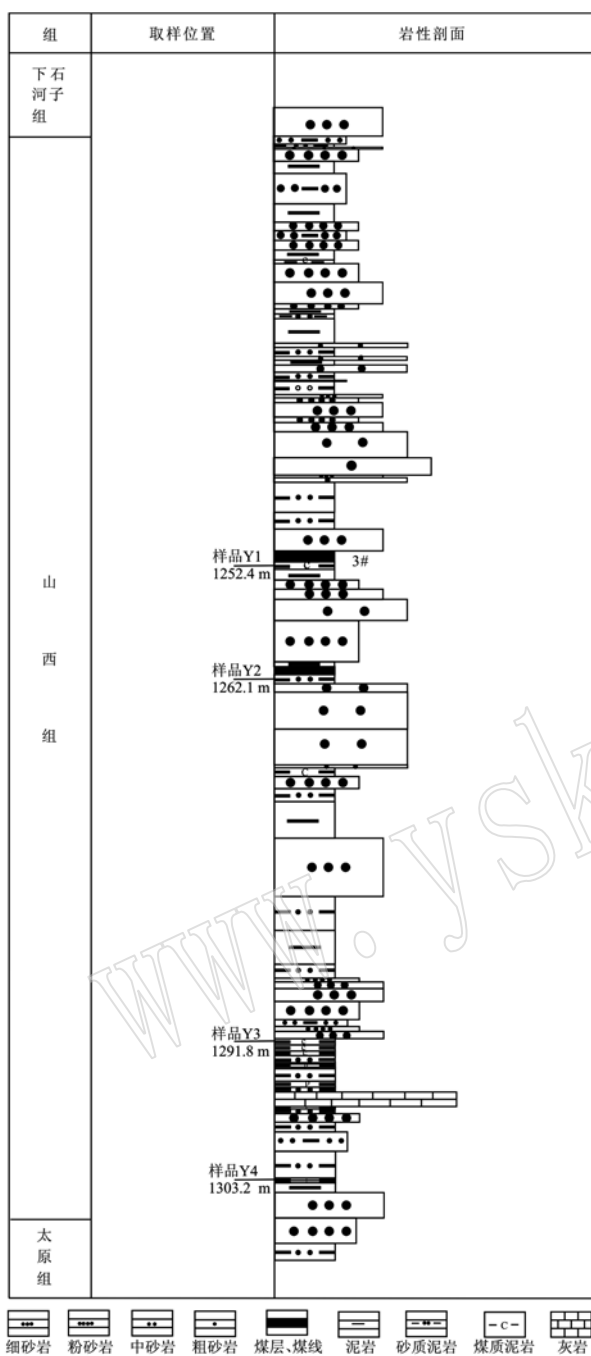


图2 研究区采样位置图
Fig. 2 Sampling position

岩样品进行高压压汞测试,并对这些样品进行有机质(TOC)测试。

XRD 实验在中国矿业大学(徐州)的现代分析测试中心完成,仪器为美国 Rigaku 公司生产的 D/Max-3B 型 X 射线衍射仪。TOC 实验在中国石化华东分公司石油勘探开发研究院实验中心完成,仪器型号为 CS-230 红外碳硫分析仪,按照 GB/T19145-2003 方法测定。高压压汞实验所用仪器为 Auto Pore IV 9500 V1.09 全自动高压汞仪,测定的孔径下限为 3.0 nm,最大测试压力为 413.79 MPa。低温液氮实验所用仪器为美国 Micromeritics Instrument Corporation,型号 Tristar3020,分析范围:材料比表面积 0.01 m²/g 至无上限,孔径分析范围 17 ~ 500 Å,可测全吸附的吸-脱附曲线、BET(比表面积)及 Langmuir 比表面积、平均孔尺寸和单点总孔体积、BJH 介孔、HK 微孔等。

3 矿物组成与有机地球化学特征

XRD 测试结果显示(表 1),泥页岩样品的矿物组成主要由黏土矿物和石英组成,含少量斜长石、黄铁矿、钾长石、菱铁矿等。其中,黏土矿物含量介于 56.2% ~ 76.1% 之间,平均值为 64.7%;黏土矿物中伊/蒙混层(I/S)含量介于 46.0% ~ 64.0% 之间,平均值为 55.2%;伊利石含量介于 11.0% ~ 33.0% 之间,平均值为 20.8%;高岭石含量介于 1.0% ~ 27.0% 之间,平均值为 15.8%;绿泥石含量介于 2.0% ~ 16.0% 之间,平均值为 8.3%;石英含量介于 19.6% ~ 38.3% 之间,平均值为 31.0%;斜长石含量介于 1.4% ~ 1.7% 之间,平均值为 1.6%;钾长石含量介于 0.6% ~ 1.3% 之间,平均值为 0.9%,含量较低;菱铁矿含量介于 0.8% ~ 1.8% 之间,平均 1.4%;黄铁矿含量介于 0.0% ~ 1.6% 之间,平均值为 0.6%。

表 1 研究区山西组泥页岩 TOC 含量及矿物组成分析结果

Table 1 TOC content and mineral composition of mud shale in Shanxi Formation of the study area

样品编号	TOC 含量/%	<i>w_B</i> /%								
		石英	钾长石	斜长石	菱铁矿	黄铁矿	伊/蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石
Y1	4.6	31.1	1.3	1.3	0.0	0.0	55.0	21.0	16.0	8.0
Y2	3.6	19.6	1.3	1.4	1.6	0.0	64.0	33.0	1.0	2.0
Y3	8.1	34.9	0.7	1.7	0.8	0.0	46.0	11.0	27.0	16.0
Y4	1.8	38.3	0.6	1.5	1.8	1.6	56.0	18.0	19.0	7.0

泥页岩样品的有机质(TOC)含量介于1.8%~8.1%之间,平均值为4.5%,有机质含量较高。

4 孔隙结构特征及分形特征

4.1 孔隙结构

泥页岩孔隙结构按孔径分类方案有很多,被广泛使用的分类方案主要有两种:一种是依据IUPAC的划分标准,将孔隙分为微孔隙(<2 nm)、介孔隙(2~50 nm)和宏孔隙(>50 nm)(Rouquerol et al., 1994);另一种是Hodot(1996)以10的N次方为基准的孔隙分类方案,将孔隙分为大孔(>1 000 nm)、中孔(100~1 000 nm)、小孔(10~100 nm)和微孔(<10 nm)(Drummond and Israelachvili, 2002; 陈冬霞等, 2002; 崔景伟等, 2012)。本文采用IUPAC的划分方案。

4.1.1 高压压汞实验

高压压汞实验可以测量泥页岩样品的渗透率、孔隙度及以大孔为主的孔隙的孔径分布特征(曹涛涛等,2015)。对研究区泥页岩样品进行压汞实验发现,样品渗透率介于 $0.0002 \times 10^{-3} \sim 0.0005 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均值为 $0.0003 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于超低

渗-非渗储层($<1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$);孔隙度介于2.0%~3.5%之间,平均值为2.87%,与北美页岩孔隙度(2%~15%)(赵帮胜等, 2019)相比偏低。

根据高压压汞曲线(图3)可以看出,研究区泥页岩样品压汞曲线总体可以分为2段:初始平台段和末端上扬段。在低压段(<10 MPa),随着压力的增大,进汞饱和度基本无变化,约为0,表现为一个较长的平台状,属于初始平台段。在高压段(>10 MPa),随着压力的增加,进汞饱和度快速增加,直到最大压力,属进汞曲线的末端上扬段。当压力小于10 MPa时,进汞量基本为0;当压力大于10 MPa(对应的孔隙半径<50 nm)时,进汞量随着压力的增大呈线性增长,这说明泥页岩孔隙中小于50 nm的孔隙比较发育。研究区泥页岩样品的分选系数为0.8524~1.0177,平均为0.957333。退汞曲线形态呈凹型,孔隙滞后环较窄,反映了研究区山西组泥页岩样品孔隙连通性较差,开放孔较少(陈尚斌等, 2012)。

在泥页岩样品的孔径分布图(图4)中可以看出主要有2个峰,峰值孔径分别在5~7 nm和15 nm左右。这说明研究区泥页岩样品主要发育5~7 nm及15 nm左右的孔隙,介孔最为发育。

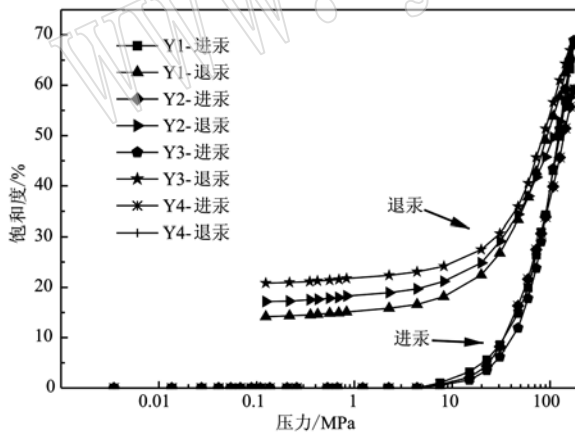


图3 泥页岩样品的压汞测试结果
Fig. 3 Mercury test results of mud shale samples

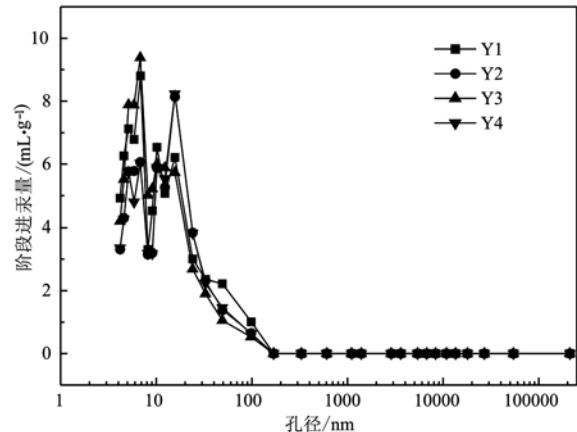


图4 压汞实验孔径分布图
Fig. 4 Pore size distribution chart of mercury pressure experiment

4.1.2 低温液氮实验

压汞实验适用于测试大孔径的孔隙,而低温液氮吸附实验适合测试孔径范围在50 nm以下的孔隙。高压压汞实验结果显示,本区泥页岩样品中介孔孔隙最为发育,因此进一步对其进行了低温液氮实验以精准测试孔隙大小。观察武乡地区Y井山西组泥页岩样品的低温液氮吸附和脱附曲线(图5)

后,发现曲线呈倒S型。Brunauer(1994)把等温线类型分为5类,本文样品吸附曲线属于该分类方案中的II型曲线,而脱附曲线属于IUPAC分类方案(陈尚斌等, 2012)中的H2型,兼具H1型及H3型,属De Boer分类方案中的B型,兼具E型及C型,主要发育裂缝形孔隙。脱附曲线在相对压力由大变小过程中在接近0.5时急剧下降,应是由于样品内部狭

缝平板型孔和“细瓶颈”孔发育引起的。

低温液氮吸附结果显示,Y井泥页岩 BET 比表面积在 10.022 ~ 15.454 m²/g 之间,平均值为13.342 m²/g;平均孔直径分布在 5.56 ~ 6.50 nm 之间,平均值为 5.75 nm,平均孔径在介孔范围内;总孔隙体积

在 0.008 12 ~ 0.012 54 cm³/g 之间,平均孔体积为 0.01 cm³/g,微孔体积约占总孔体积的 19.85%,介孔体积约占总孔体积 69.87%,宏孔体积约占总孔体积 10.28%,可见介孔是孔容的主要贡献者。

从孔径分布图(图6)中可知,山西组泥页岩集

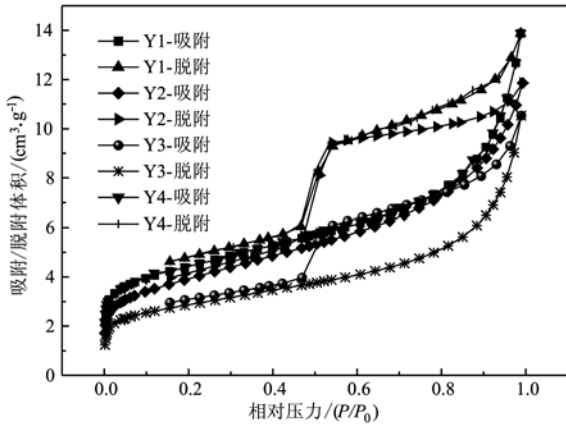


图5 泥页岩样品的低温液氮吸附与脱附曲线
Fig. 5 Low temperature liquid nitrogen adsorption and desorption curve of mud shale

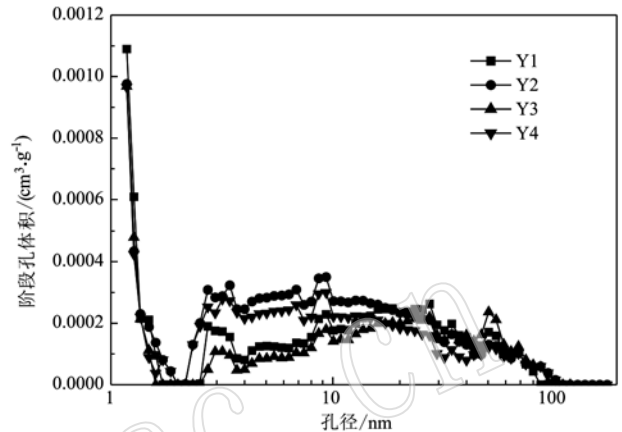


图6 低温液氮实验孔径分布图
Fig. 6 Aperture distribution of low temperature liquid nitrogen experiment

中型主峰均分布于 1.18 nm 附近,说明武乡地区 Y 井泥页岩储层孔隙孔径以 1.18 nm 及以下的纳米级微孔孔隙为主。

综合低温液氮及压汞实验的分析结果可知,武乡地区 Y 井山西组泥页岩孔隙中主要发育介孔和微孔,15 nm 及以下的孔隙是孔容的主要贡献者。

4.2 孔隙结构分形特征

4.2.1 页岩孔隙分型特征

根据 Pfeiferp 和 Frenkel-Halsey-Hill(FHH)的分形模型公式: $\ln V = K \ln[\ln(p_0/p)] + C$, $K = D - 3$ (p_0 为气体吸附的饱和蒸气压, p 为平衡压力, V 为 p 对应的吸附体积, K 为常数, D 为分形维数)(陈燕燕等, 2015),对武乡地区 Y 井山西组泥页岩的低温液氮实验数据进行处理并计算出分形维数 D ,然后选取 $p_0/p > 0.45$ 的吸附数据对 $\ln V$ 与 $\ln[\ln(p_0/p)]$ 进行拟合。拟合结果(图7)表明, $\ln V$ 与 $\ln[\ln(p_0/p)]$

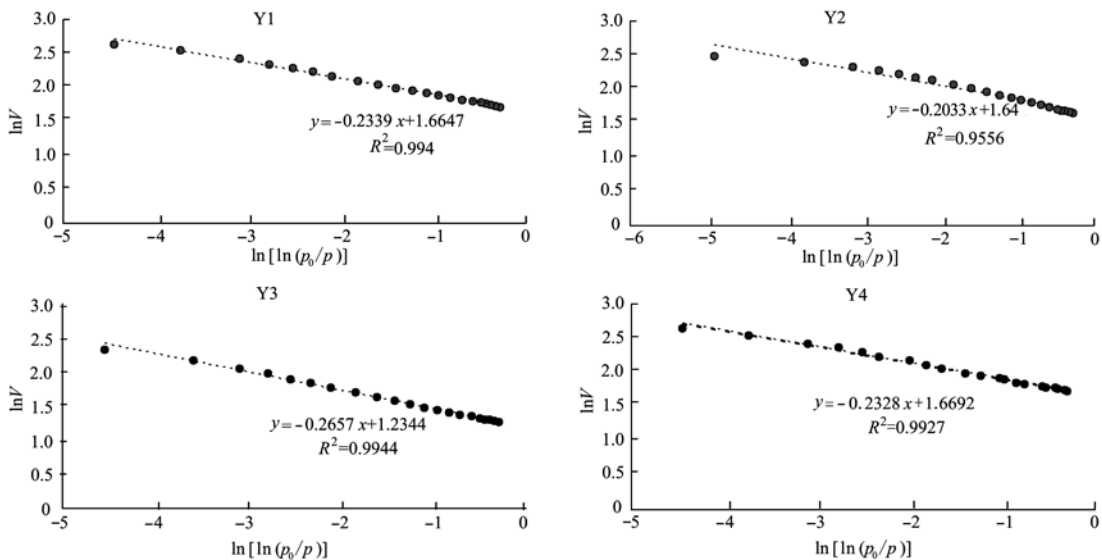


图7 研究区山西组泥页岩分形维数图

Fig.7 Fractal dimension of mud shale in Shanxi Formation of the study area

呈负的线性相关性, $K = -0.266 \sim -0.203$, 根据 $D = 3 + K$ 求出分形维数 D 值介于 $2.760 \sim 2.800$ 之间, 相关因素 R^2 均在 0.95 以上。一般来说, D 值越靠近 3 , 孔隙结构越复杂, 储集性能越好, 非均质性越强; D 值靠近 2 , 说明泥页岩孔隙表面属于光滑表面 (Jaroniec, 1995)。样品 D 值接近于 3 , 说明 Y 井泥页岩孔隙结构较复杂且非均质性较强。

4.2.2 分形维数影响因素

研究区山西组泥页岩矿物成分主要是黏土矿物和石英, 因此详细讨论了两种主要矿物对分形维数的影响。如图 8 所示, 分形维数 D 与黏土矿物含量之间的相关性不强, 相关因素 R^2 为 0.4801 ; 分形维数与石英含量呈弱负相关性, 相关因素 R^2 为 0.589

8, 即分形维数随石英含量的增加而降低, 其原因可能是研究区二叠系山西组泥页岩中石英的微裂缝发育程度较差。

进一步探讨分形维数与泥页岩各参数之间的关系, 发现分形维数与总孔体积呈高度线性正相关关系, 相关因素 R^2 为 0.8909 (图 9), 即分形维数随平均孔径增加而增加; 分形维数与 BET 比表面积拟合的相关因素 R^2 为 0.4933 , 二者相关性不强; 分形维数与平均孔径拟合的相关因素 R^2 为 0.9231 , 呈高度线性负相关, 即随着平均孔径的增大分形维数变小。分形维数与 TOC 含量拟合的相关因素 R^2 为 0.9318 , 呈高度线性正相关, 这表明有机质含量的增加使孔隙结构变得更加复杂。

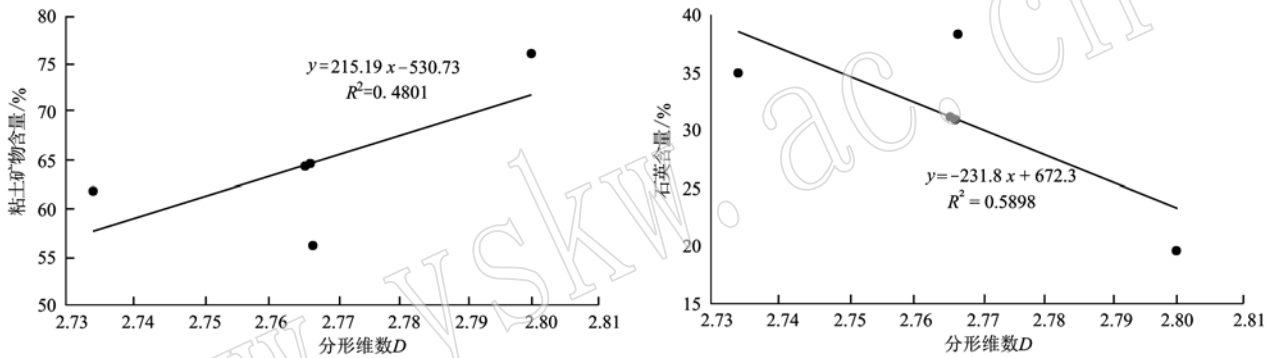


图 8 山西组泥页岩矿物成分与分形维数关系图
Fig. 8 Relationship between mineral composition and fractal dimension of mud shale in Shanxi Formation

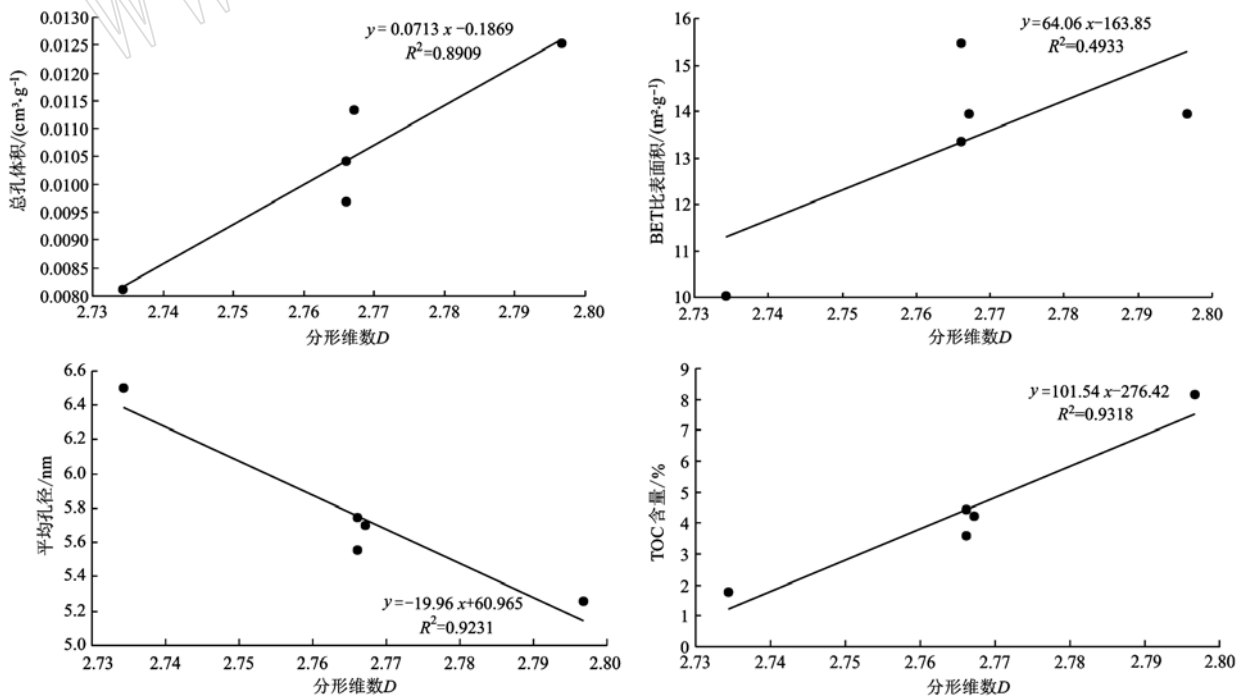


图 9 分形维数与孔隙结构参数、储层物质组分的线性关系

Fig. 9 Linear relationship between fractal dimension and pore structure parameters as well as composition of reservoir material

综上所述,研究区 Y 井山西组泥页岩分形维数接近 3,非均质性较强;总孔体积、平均孔径和 TOC 含量是泥页岩储层分形维数接近 3 的重要影响因素。

5 结论

(1) Y 井山西组泥页岩矿物组成以黏土矿物和石英为主,有机碳含量高。泥页岩中孔隙以微孔和介孔为主,主要发育狭缝平板型孔和“细瓶颈”孔。泥页岩吸附曲线呈倒 S 型,属于 Brunauer 等温线类型分类方案中的 II 型曲线,其解吸回线属于 IUPAC 分类方案中的 H2 型,兼具 H1 型及 H3 型,属 De Boer 分类方案中的 B 型,兼具 E 型及 C 型。泥页岩孔隙中主要发育介孔和微孔 (<50 nm),15 nm 及以下的孔隙是孔容的主要贡献者。

(2) 采用 FHH 分形模型进行分析,分形维数 D 值介于 2.760 ~ 2.800 之间, D 值接近 3 说明研究区泥页岩孔隙内部结构比较复杂,非均质性较强。矿物成分、总孔体积、平均孔径和 TOC 含量是泥页岩储层分形维数接近于 3 的重要影响因素。

References

- Brunauer D H. 1994. The Four Seasons of Marian Forrster[J]. *Journal of Evolutionary Psychology (JEP)*, 15(1~2): 54~59.
- Cao Taotao, Song Zhiguang, Wang Sibao, *et al.* 2015. Physical properties and controlling factors of the Permian shale reservoirs in the Lower Yangtze Platform[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(2): 341~351 (in Chinese).
- Drummond C and Israelachvili J. 2002. Surface forces and wettability [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 33(1~3): 123~133.
- Chen Dongxia, Pang Xiongqi and Jiang Zhenxue. 2002. Research status and development trend of hydrocarbon accumulation mechanism in lens body[J]. *Advances in Earth Science*, 17(6): 871~876 (in Chinese).
- Chen Shangbin. 2016. Study on the microstructure of sedimentary reservoir and its adsorption heterogeneity[J]. *Coal Science and Technology*, 44(6): 23~32 (in Chinese).
- Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, *et al.* 2012. Nanopore structure characteristics and accumulation significance of shale gas reservoirs in Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 37(3): 438~444 (in Chinese).
- Chen Yanyan, Zou Caineng, Maria Mastalerz, *et al.* 2015. Study on micropore evolution and fractal characteristics of shale[J]. *Natural Gas Geoscience*, 26(9): 1646~1656 (in Chinese).
- Chen Yue, Ma Dongmin, Wu Sheng, *et al.* 2018. Pore characteristics and main controlling factors of associated mudshale in the eastern margin of the Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 29(2): 189~198 (in Chinese).
- Cui Jingwei, Zou Caineng and Zhu Rukai. 2012. New progress in shale pore research[J]. *Advances in Earth Science*, 27(12): 1319~1325 (in Chinese).
- Curtis J B. 2002. Fractured shale-gas systems[J]. *AAPG Bulletin*, 86(11): 1921~1938.
- Hodot B B. 1996. Coal and Gas Outburst[M]. Song Shizhao and Wang You'an. Translated. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press (in Chinese).
- Guo Yinghai and Zhao Difei. 2015. Study on micro-heterogeneity of marine shale reservoirs on microscopic scale[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 44(2): 300~307 (in Chinese).
- Huang Xinglong. 2018. Exploration prospect of shale gas from Shanxi Formation to Taiyuan Formation in coal-bearing areas of Southwest Shandong[J]. *Coal Technology*, 37(8): 82~85 (in Chinese).
- Jaroniec M. 1995. Evaluation of the fractal dimension from a single adsorption isotherm[J]. *Langmuir*, 11(6): 2316~2317.
- Liu Chong, Li Zhongming, Zhang Dong, *et al.* 2018. Pore structure and its influencing factors of shale of Shanxi-Taiyuan Formation in Western Henan Province, taking well ZXY1 as an example[J]. *Geological Prospecting Theory Cluster*, 33(4): 580~588 (in Chinese).
- Liu Jiacheng, Liu Jiaju, Zhang Dong, *et al.* 2019. Gas-bearing controlling factors of shale from Shanxi Formation to Taiyuan Formation in Mouye Well 1, Henan [J]. *Geological Prospecting Theory Cluster*, 34(2): 219~224 (in Chinese).
- Nie Haikuan and Zhang Jinchuan. 2011. Study on the types and characteristics of shale gas reservoirs: A case study of the Lower Paleozoic in the Sichuan Basin and its periphery[J]. *Petroleum Geology Sinoica*, 33(3): 219~225, 232 (in Chinese).
- Qin Yong, Wei Chongtao, Zhang Zheng, *et al.* 2016. Geological control of the free gas accumulation in the middle-south coal system and its overlying strata in the Qinshui Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(3): 24~35 (in Chinese).
- Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, *et al.* 1994. Physical chemistry division commission on colloid and surface chemistry, subcommittee on characterization of porous solids: Recommendations for the charac-

- terization of porous solids[J]. International Union of Pure and Applied Chemistry, 66(8): 1 739 ~ 1 758.
- Su Yufei, Zhang Qinghui and Wei Zicong. 2016. Evaluation of Carboniferous-Permian shale gas resources potential in Qinshui Basin[J]. China Coal Geology, 28(4): 27 ~ 34(in Chinese).
- Tian Zhiqiang. 2016. Analysis of sedimentary environment of Shanxi Formation in Zhaozhuang exploration area of Qinshui Coalfield[J]. China National and Resources, 3: 23 ~ 24(in Chinese).
- Zhao Bangsheng, Li Rongxi, Qin Xiaoli, *et al.*, 2019. Characteristics of shale reservoirs in the upper Paleozoic Shanxi Formation, central Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37(6): 1 140 ~ 1 151 (in Chinese).
- Zhu Yanming, Wang Yang, Chen Shangbin, *et al.* 2016. Multi-scale qualitative-quantitative comprehensive characterization of porosity of shale reservoir: A case study of the marine Longmaxi Formation of the Upper Yangtze[J]. Earth Science Frontiers, 23(1): 154 ~ 163(in Chinese).
- 曹涛涛, 宋之光, 王思波, 等. 2015. 下扬子地台二叠系页岩储集物性特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 26(2): 341 ~ 351.
- 陈冬霞, 庞雄奇, 姜振学. 2002. 透镜体油气成藏机理研究现状与发展趋势[J]. 地球科学进展, 17(6): 871 ~ 876.
- 陈尚斌. 2016. 页岩储层微观结构及其吸附非均质性研究评述[J]. 煤炭科学技术, 44(6): 23 ~ 32.
- 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 2012. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. 煤炭学报, 37(3): 438 ~ 444.
- 陈燕燕, 邹才能, Maria Mastalerz, 等. 2015. 页岩微观孔隙演化及分形特征研究[J]. 天然气地球科学, 26(9): 1 646 ~ 1 656.
- 陈跃, 马东民, 吴圣, 等. 2018. 鄂尔多斯盆地东缘煤系伴生页岩孔隙特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 29(2): 189 ~ 198.
- 崔景伟, 邹才能, 朱如凯. 2012. 页岩孔隙研究新进展[J]. 地球科学进展, 27(12): 1 319 ~ 1 325.
- 霍多特 B B. 1996. 煤与瓦斯突出[M]. 宋世钊, 王佑安译. 徐州: 中国矿业大学出版社.
- 郭英海, 赵迪斐. 2015. 微观尺度海相页岩储层微观非均质性研究[J]. 中国矿业大学学报, 44(2): 300 ~ 307.
- 黄兴龙. 2018. 鲁西南含煤区山西组-太原组页岩气勘探前景[J]. 煤炭技术, 37(8): 82 ~ 85.
- 刘冲, 李中明, 张栋, 等. 2018. 豫西地区山西组-太原组页岩孔隙结构及其影响因素——以ZXY1井为例[J]. 地质找矿论丛, 33(4): 580 ~ 588.
- 刘家橙, 刘家橘, 张栋, 等. 2019. 河南牟页1井山西组-太原组页岩含气性控制因素[J]. 地质找矿论丛, (2): 219 ~ 224.
- 聂海宽, 张金川. 2011. 页岩气储层类型和特征研究——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 石油实验地质, 33(3): 219 ~ 225, 232.
- 秦勇, 韦重韬, 张政, 等. 2016. 沁水盆地中-南部煤系及其上覆地层游离天然气成藏的地质控制[J]. 地学前缘, 23(3): 24 ~ 35.
- 苏育飞, 张庆辉, 魏子聪. 2016. 沁水盆地石炭系-二叠系页岩气资源潜力评价[J]. 中国煤炭地质, 28(4): 27 ~ 34.
- 田志强. 2016. 沁水煤田赵庄勘查区山西组沉积环境分析[J]. 华北国土资源, (3): 23 ~ 24.
- 赵帮胜, 李荣西, 覃小丽, 等. 2019. 鄂尔多斯盆地中部上古生界山西组页岩储层特征[J]. 沉积学报, 37(6): 1 140 ~ 1 151.
- 朱炎铭, 王阳, 陈尚斌, 等. 2016. 页岩储层孔隙结构多尺度定性-定量综合表征: 以上扬子海相龙马溪组为例[J]. 地学前缘, 23(1): 154 ~ 163.

附中文参考文献