

鄂尔多斯盆地渭北地区页岩纳米孔隙发育特征及其控制因素

吴建国^{1,2,3}, 刘大锰^{1,2}, 姚艳斌^{1,2}

(1. 中国地质大学 能源学院, 北京 100083; 2. 非常规天然气地质评价及开发工程北京市重点实验室, 北京 100083; 3. 页岩气勘查与评价国土资源部重点实验室, 北京 100083)

摘要:为深入研究鄂尔多斯盆地东南缘渭北地区页岩储层中纳米孔隙的发育特征及其地质控制因素,对采自太原组、山西组和延长组三套泥页岩层的11块样品进行低温氮吸附实验、氩离子抛光-场发射扫描电镜、显微组分、镜质体反射率(R_o)、总有机碳(TOC)和X-射线衍射等系列分析测试。研究表明,研究区泥页岩处于低成熟向成熟转变阶段,有机碳含量差异较大,储层纳米级孔隙以中小孔(粒径2~50 nm)为主,约占总孔体积的63.5%,BET比表面积大多在10 m²/g以上,有利于页岩气的吸附;孔隙形态以“狭缝状”和“墨水瓶”形孔隙为主。研究区页岩的矿物类型具有明显的区域差异性:韩城区以粘土矿物为主,而铜川区以脆性矿物为主。粘土矿物含量与微孔(粒径<2 nm)、中小孔总含量呈显著的正相关性,而脆性矿物含量与大孔(粒径>50 nm)含量正相关,因此矿物类型差异是影响该区页岩纳米孔隙发育的主控因素。另外, R_o 与TOC对纳米孔隙发育也有一定的影响:页岩 R_o 越高,大孔含量越高、中小孔含量越低;有机碳含量越高,微孔和中小孔含量越高。

关键词:低温氮吸附;纳米孔隙;页岩气;渭北地区;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and controlling factors of nanopores in shales in Weibei, Ordos Basin

Wu Jianguo^{1,2,3}, Liu Dameng^{1,2}, Yao Yanbin^{1,2}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development Engineering, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Shale Gas Exploration and Evaluation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: To better understand the development characteristic of nanopores and its geological controlling factors, we collected 11 shale samples from the Taiyuan, Shanxi, and Yanchang formations in the Weibei, southeastern Ordos Basin, and performed low-temperature nitrogen adsorption, Argon-ion milled and field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), vitrinite reflectivity (R_o) and maceral composition, total organic carbon (TOC) content and X-ray diffraction (XRD) analyses. The selected shale samples are in the transition period from low mature to mature, and are quite different in TOC. The nanopores in the shales are dominated by pores within the size of 2~50 nm, which account for 63.5% of the total pore volume. The BET specific surface area is commonly higher than 10 m²/g, indicating a favorable condition for methane adsorption. The pore types are mainly of narrow-slit pores and ink-bottle shaped pores. The dominant mineral compositions are different from area to area: clay minerals being dominated in the Hancheng area, while brittle minerals being dominated in the Tongchuan area. Clay mineral content is positively correlated with the total content of nanopores smaller than 2 nm and that within 2~50 nm, while the brittle mineral content is positively correlated with the content of nanopores larger than 50 nm. This means that the difference in mineral types is the main control factor on the development of nanopores. Moreover, R_o and TOC also have some influences on the development of nanopores. The higher the R_o is, the higher content of large nanopores is, but the lower content of medium to small nanopores is. In addition, the higher the TOC, the higher content of medium to small nanopores is.

Key words: low-temperature nitrogen adsorption, nanopore, shale gas, Weibei area, Ordos Basin

收稿日期:2014-01-16;修订日期:2014-06-20。

第一作者简介:吴建国(1988—),男,硕士研究生,矿产普查与勘探专业。E-mail: bluesky36998@126.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX0562); 国家自然科学基金-中国石油天然气集团公司石油化工联合基金项目(U126104); 中央高校基本科研业务费项目(2652013001)。

页岩孔隙的结构类型及发育特征影响着页岩的储气性能^[1],是页岩气资源潜力评价的关键参数之一,识别页岩孔隙特征、判断其影响因素对页岩气储层地质研究具有重要意义。国外已广泛利用氩离子抛光-SEM、纳米CT等先进手段来对页岩储层进行大量的微观观测与分析^[2-7],国内一些学者主要集中对南方页岩气储层的微观结构做了表征^[8-16],但针对鄂尔多斯这一页岩气富集盆地开展的相关工作却为数不多^[17]。位于鄂尔多斯东南缘的渭北地区发育有3套含气泥页岩,即石炭系太原组、二叠系山西组煤系地层泥页岩和三叠系延长组暗色泥页岩,目前对其储层特征并不明晰,相关工作需要深入开展,以查明本区泥页岩纳米孔隙特征及其控制因素,为其后续资源评价工作提供相关依据。

利用低温氮吸附实验分析了渭北地区泥页岩的孔隙大小、孔径分布、BET比表面积、总孔体积及孔隙结构类型等参数,结合氩离子抛光-场发射扫描电镜技术对研究区纳米孔隙进行了系统的精细定量表征,重点阐明了镜质体反射率(R_o)、总有机碳(TOC)、脆性矿物及粘土矿物含量对储层孔隙发育的影响规律。

1 样品与方法

1.1 样品采集

鄂尔多斯盆地位于华北板块,是一个经历了多期构造运动叠合形成的克拉通盆地,其东南缘的渭北隆起为盆地的一级构造单元,总体呈近东西-北东向展布(图1)。该地区主要发育3套富有机质泥页岩层系:上古生界石炭系太原组滨海沼泽相页岩,以及二叠系山西组河流相泥页岩,与煤共生,埋藏较深;中生界三叠系延长组长7、长9段深湖-半深湖相暗色页岩,埋藏相对较浅^[18-19]。研究所用的11块样品主要采集于渭北地区的韩城矿区和铜川矿区,涉及晚古生代一晚三叠世的典型泥页岩沉积地层(图1),具有较好的代表性。

1.2 研究方法

目前,识别页岩孔隙发育特征的方法很多^[20],本

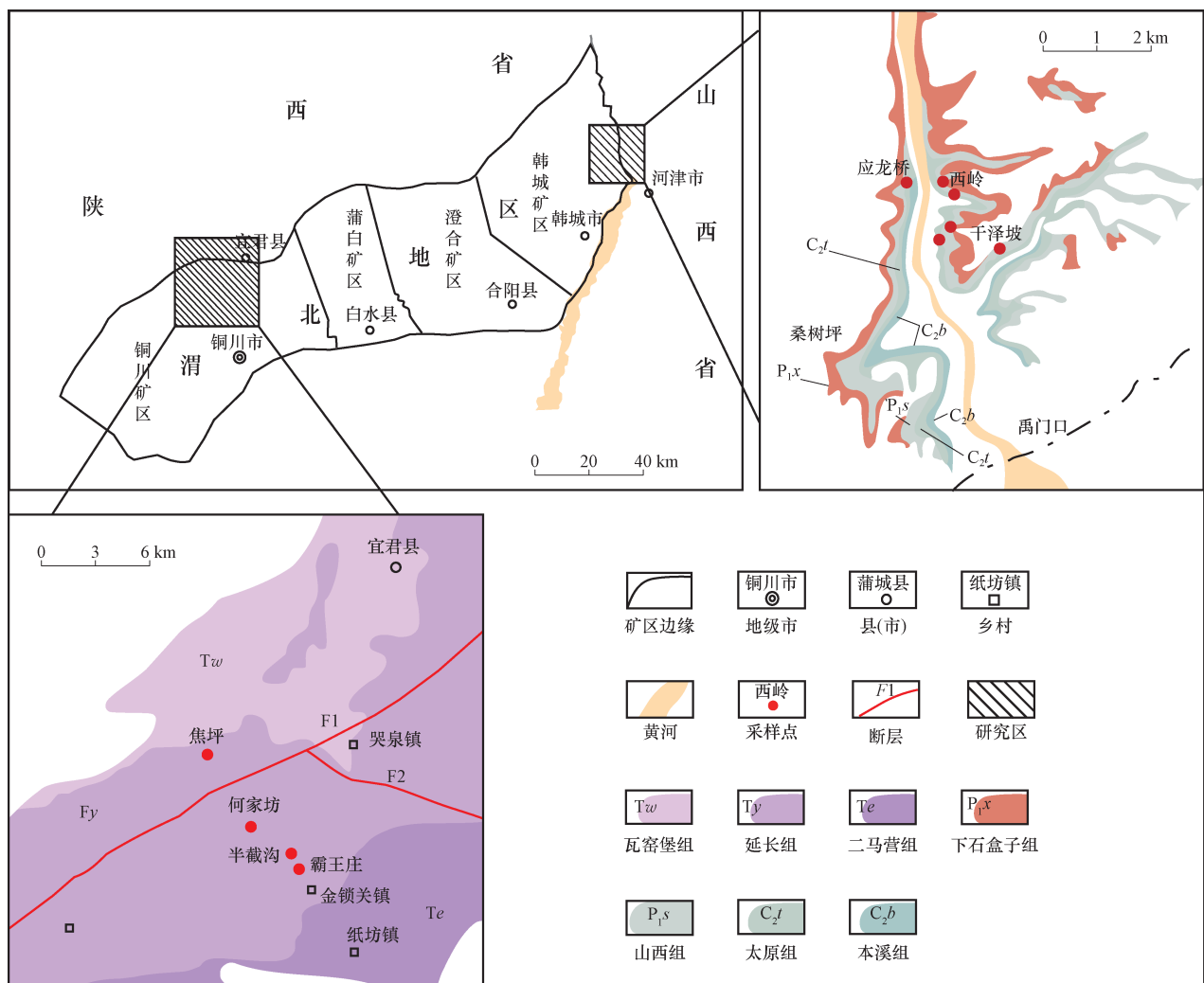


图1 研究区位置及采样点分布

Fig. 1 Study area and sampling locations

次以低温氮吸附法为主,以场发射扫描电镜为辅,二者结合的优势在于,不但可以通过低温氮吸附法对页岩纳米孔隙的发育情况进行定量描述,而且还可以在电镜下直接的观察纳米孔隙的形态、大小和分布。低温氮吸附实验依据 GB/T 19587—2004 进行,仪器为美国 Micromeritics ASAP 2020 型孔隙结构分析仪,采用容量法在 77.4 K 以下氮(99.99%)为吸附介质,在相对压力 0.01 ~ 1 之间测定氮气吸附等温线,孔径测量范围为 0.35 ~ 500 nm。采用 FEI Quanta 200F 场发射扫描电镜,对经过氩离子抛光后的样品进行扫描成像。

为查明研究区页岩纳米孔隙发育的控制因素,对所有样品进行了总有机碳含量(TOC)、全岩 X-射线衍射和粘土矿物含量分析,对部分样品的有机质成熟度和显微组分做了测试,相关测试均按照国家标准开展,结果见表 1。

2 结果分析

2.1 有机岩石学、有机地化及矿物定量结果

从表 1 中可以看出,样品的镜质体反射率(R_o)为 0.58% ~ 1.46%,平均为 0.85%,表明有机质大多处于低成熟-成熟阶段。总有机碳(TOC)为 0.15% ~ 19.80%,变化范围较大。干酪根类型大多为Ⅲ型,腐殖型,成气为主。有机显微组分以镜质组为主(57.0% ~ 97.7%);惰质组含量变化范围大,最高达 43.0%。最低仅 2.5%;壳质组不发育。研究区矿物成分以粘土矿物和石英为主,还有少量的钾长石、钠长石、方解石、白云石和黄铁矿。以石英、长石和碳酸盐类矿物为主的脆性矿物含量为 9.3% ~ 66.0%,平均为 40.17%;而粘土矿物含量为 34.0% ~ 90.7%,平均为 59.05%,

整体而言,韩城矿区页岩样品的粘土矿物含量大于脆性矿物含量,不利于后期的压裂作业;而铜川矿区样品的脆性矿物含量则大于粘土矿物含量。

2.2 纳米孔隙体积、比表面积及孔径分布

低温氮吸附测试得到样品的吸附/脱附曲线和平均孔径;比表面积选用多点 BET 模型线性回归得到;总孔体积选用 BJH 模型计算得到,所得结果如表 2。

研究区样品 BET 比表面积在 6.272 ~ 18.228 m²/g,平均为 14.23 m²/g,除 YLQ-1 和 BWZ-1 以外,其他样品均高于 10 m²/g,表明页岩 BET 比表面积较大,有利于页岩气的吸附。BJH 总孔体积在 0.009 8 ~ 0.039 0 cm³/g,平均为 0.022 1 cm³/g。根据国际理论和应用化学协会(IUPAC)的孔隙分类^[21],将页岩孔隙大小划分为微孔(micropore,粒径 < 2 nm)、中小孔(mesopore,粒径 2 ~ 50 nm)、大孔(macropore,粒径 > 50 nm)。实验测试显示,样品平均孔直径在 5.88 ~ 9.02 nm,属于中小孔范围,表明中小孔占绝对优势,体积含量为 54.66% ~ 76.46%,大孔次之,微孔含量少。

2.3 孔隙结构模型

页岩低温氮吸附实验原理符合孔隙材料吸附和凝聚的理论,因此可以根据测试得到的氮气吸附/脱附曲线特征来判断孔隙的形态,从而确定不同的孔隙模型。关于吸附/脱附曲线的分类,目前应用较多的是 De Boer 提出的 5 类划分方案^[22](图 2),实际应用中得到的吸附/脱附曲线往往是几类典型曲线的复合、叠加。

图 3 是本次测试得到的吸附/脱附曲线,各样品的吸附/脱附曲线在形态上略有差别,但整体呈反 S 型,其具体特征是:吸附线在低压段稳定上升,在高压段上升速度加快,但在接近饱和蒸汽压时并未出现吸附饱和现象,表明样品中含有一定量的中小孔和大孔,由于

表 1 有机岩石学、有机地化及矿物定量结果
Table 1 Analysis results of organic petrology, organic geochemistry and mineral contents

矿区	样号	层位	R_o /%	TOC/%	有机显微组分含量/%			干酪根类型	脆性矿物含量/%	粘土矿物含量/%
					镜质组	惰质组	壳质组			
韩城 矿区	GZP-1	太原组	0.58	5.92	57.0	43.0	0.0	Ⅲ	9.3	90.7
	GZP-2	山西组	0.87	2.56	65.4	34.6	0.0		24.1	75.9
	GZP-3	山西组	0.72	0.78	92.6	7.4	0.0		19.9	80.1
	XL-1	山西组	—	0.41	—	—	—	Ⅲ	36.6	63.4
	XL-2	山西组	0.89	0.61	94.4	5.6	0.0		33.4	66.6
	YLQ-1	太原组	1.46	1.71	97.7	2.3	0.0		35.4	59.5
铜川 矿区	BJG-1	延长组	—	0.42	—	—	—	Ⅲ	58.8	41.2
	BJG-2	延长组	—	0.41	—	—	—		48.2	51.8
	BWZ-1	延长组	0.81	0.64	93.8	6.3	0.0		65.6	34.4
	HJF-1	延长组	—	0.15	—	—	—		66.0	34.0
	JP-1	延长组	0.61	19.80	97.5	2.5	0.0		44.6	52.0

表 2 氮气吸附测试结果
Table 2 Results of nitrogen adsorption

矿区	样号	BET 比表面 积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	BJH 总孔 体积/($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	平均孔 直径/nm	孔体积含量/%		
					微孔	中小孔	大孔
韩城 矿区	GZP-1	18.228	0.039 0	9.02	1.08	76.46	22.47
	GZP-2	12.559	0.019 6	6.99	3.32	64.68	32.01
	GZP-3	16.721	0.021 2	5.88	3.58	69.18	27.24
	XL-1	10.387	0.014 0	6.20	4.15	62.02	33.83
	XL-2	10.201	0.014 9	6.72	3.30	59.38	37.32
	YLQ-1	6.272	0.009 8	7.03	2.15	54.66	43.19
铜川 矿区	BJG-1	15.084	0.021 0	6.37	3.86	62.22	33.92
	BJG-2	23.820	0.035 9	6.74	3.43	63.90	32.67
	BWZ-1	9.942	0.015 1	6.79	3.44	59.81	36.75
	HJF-1	15.173	0.022 0	6.58	3.99	60.78	35.22
	JP-1	18.160	0.030 9	7.31	2.68	65.43	31.89

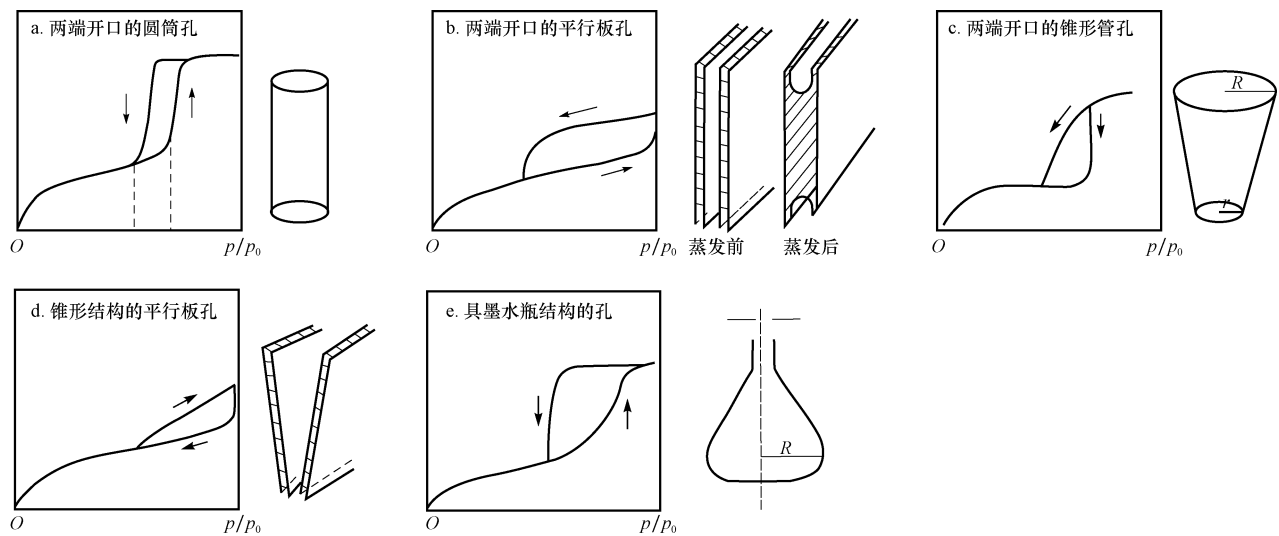


图 2 吸附/脱附曲线分类及其孔隙结构类型^[22]

Fig. 2 Classification of adsorption/desorption curves and pore structure^[22]

毛细凝聚而发生了大孔充填;脱附线在高压段下降相对缓慢,在相对压力(p/p_0)为 0.4~0.5 出现明显的拐点,形成急剧下降段,随后($p/p_0 < 0.4$)下降速度进一步变慢,几乎与吸附曲线发生重合,形成一个“滞后环”。

吸附曲线在饱和蒸汽压附近很陡,而脱附曲线在中等压力处很陡,这与 De Boer 分类中的 B 型较为相似,并且兼有 E 型曲线的特征,因此,可以认为研究区页岩样品的吸附/脱附曲线为其二者的不均等叠加,其孔隙结构是平行壁的狭缝状孔与细颈广体的“墨水瓶”形孔的无规则配置。图 4 是经氩离子抛光后的 GZP-1 和 GZP-2 在场发射扫描电镜下的图像,可以观察到菱铁矿颗粒之间和有机质内都有大量的狭缝状孔和“墨水瓶”形纳米孔,从而验证了以上结论。

总体来说,研究区页岩中的纳米级孔隙多为开放型孔(封闭型孔无法产生脱附回线),为吸附态和游离态的页岩气提供了储存空间。

3 纳米孔隙发育控制因素

研究发现,页岩孔隙发育情况主要受到有机质成熟度(R_o)、总有机碳(TOC)、脆性矿物含量以及粘土矿物含量的影响。这些因素之间的作用结果具有多样性和复杂性。

3.1 成熟度对孔隙发育的影响

图 5 分别展示了微孔、中小孔和大孔的体积含量随着 R_o 增大而发生的变化。比较明显的是,随着 R_o 增大,中小孔的含量呈现出非线性下降的趋势,下降速度越来越慢,至 R_o 为 1.4% 左右出现极低值, R_o 进一步增大时,中小孔含量开始缓慢上升;大孔含量的变化正好与中小孔相反,呈现出一种上升—极高值—下降的非线性趋势。较中小孔和大孔而言,微孔含量随 R_o

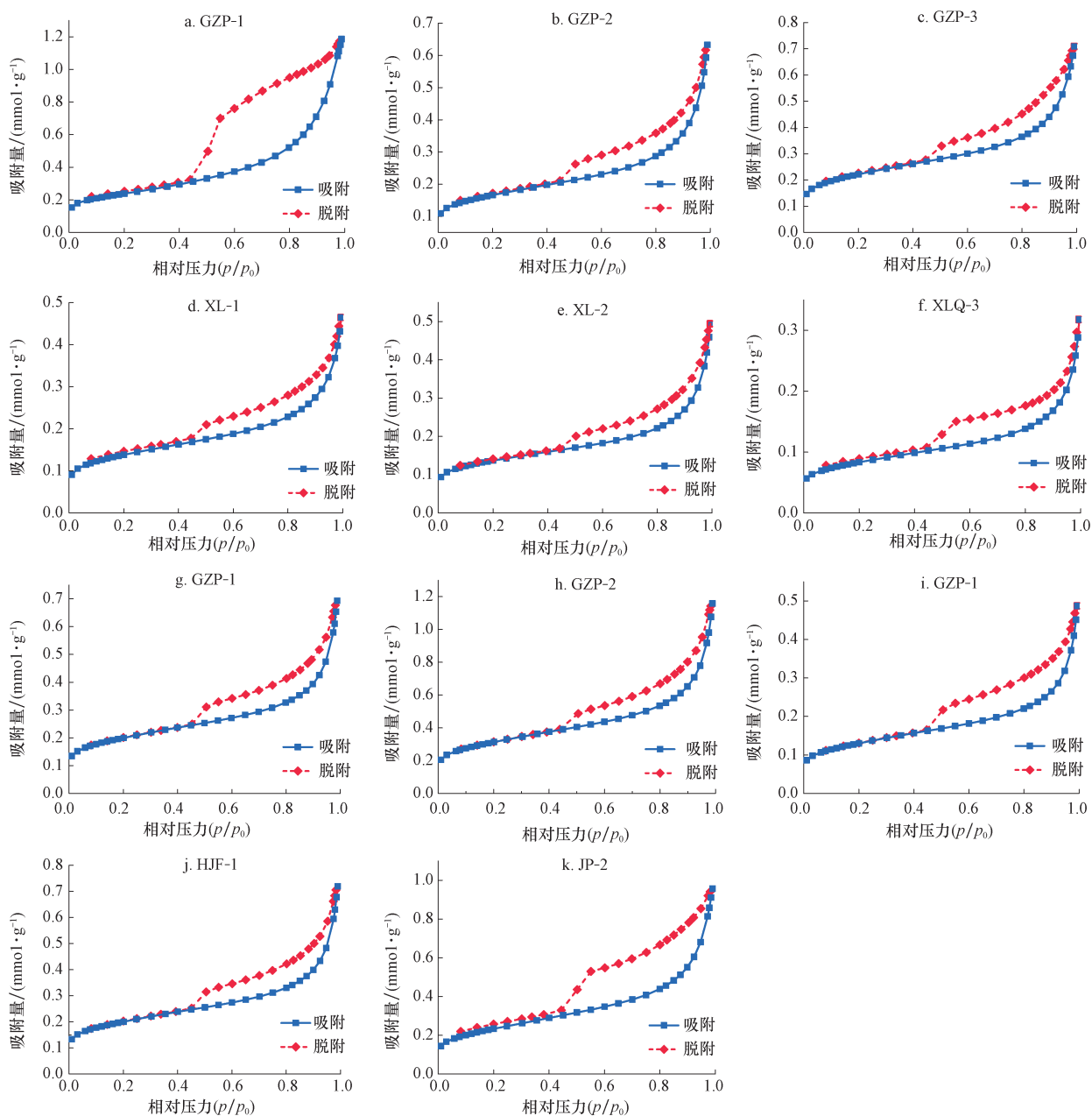


图3 页岩样品等温吸附/脱附曲线

Fig. 3 Low-temperature nitrogen adsorption/desorption isotherms of shale samples

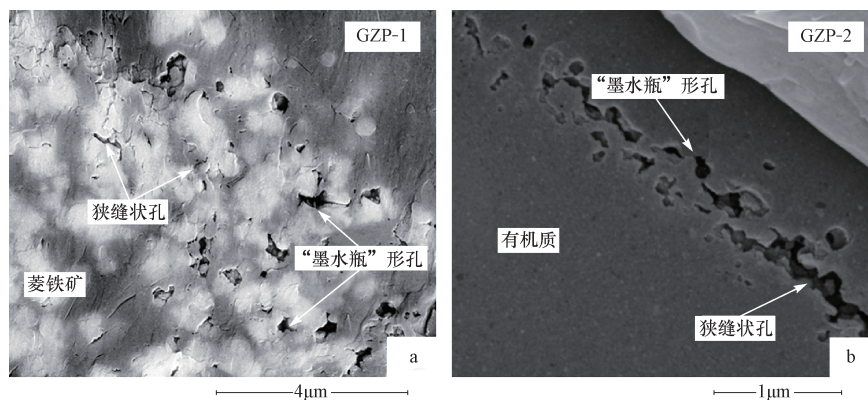


图4 经氩离子抛光后样品表面场发射扫描电镜分析结果

Fig. 4 Results of FE-SEM analysis Argon ion milled samples

a. GZP-1 样, $R_o = 0.58\%$; b. GZP-2 样, $R_o = 0.87\%$

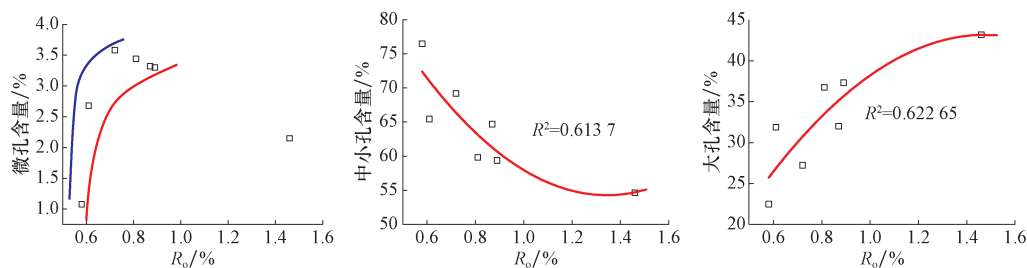
图5 R_o 与微孔、中小孔及大孔含量的关系

Fig. 5 Maturity of organic matters vs. contents of large, medium and small nanopores

变化的规律不是太明显,但整体上可判断为随着 R_o 增大而升高。与之相似,Curtis 等^[4]发现 Woodford 页岩中的有机质在低成熟阶段 ($R_o < 0.6\%$) 没有原生孔隙发育,随着 R_o 的增大,有机孔隙发育增多,并在 R_o 为 1.6% 时,达到最多,而当 R_o 增大到 2.0% 时,有机孔反而消失,随后有机孔又开始呈上升趋势发育。

出现以上现象的原因是, R_o 小于 0.6% 时,页岩有机质中孔隙发育极少,主要以基质中的原生孔隙为主;当 R_o 在 $0.6\% \sim 1.6\%$ 时,随着有机质成熟度在温压作用下的增大,热变气孔逐渐增多,这些气孔构成了微孔的大部分,导致微孔含量呈上升趋势。而作为以基质孔隙为主的中小孔,在 R_o 增大过程中,基质孔隙含量因受到压实而下降,造成了中小孔含量的下降。

大孔的增大则与成熟有机质中纳米级显微裂缝的发育增多有关。

图6表明,中小孔的数量对孔隙比表面积和总孔体积具有决定性的贡献作用,因此 R_o 可以通过影响中小孔的发育引起比表面积和总孔体积的变化,图7显示了 R_o 与比表面积和总孔体积的关系,二者整体呈下降趋势。这是因为,低成熟阶段随着 R_o 增大,中小孔数量减少,导致了比表面积和总孔体积的贡献来源变少。

3.2 总有机碳含量对孔隙发育的影响

由图8可知,总有机碳(TOC)与大孔含量的相关性差,与微孔和中小孔的总含量具有一定的正相关性。有机质中发育的孔隙主要为热成因气孔,其大小一般为纳米级别,是纳米级孔隙的重要来源之一。页岩

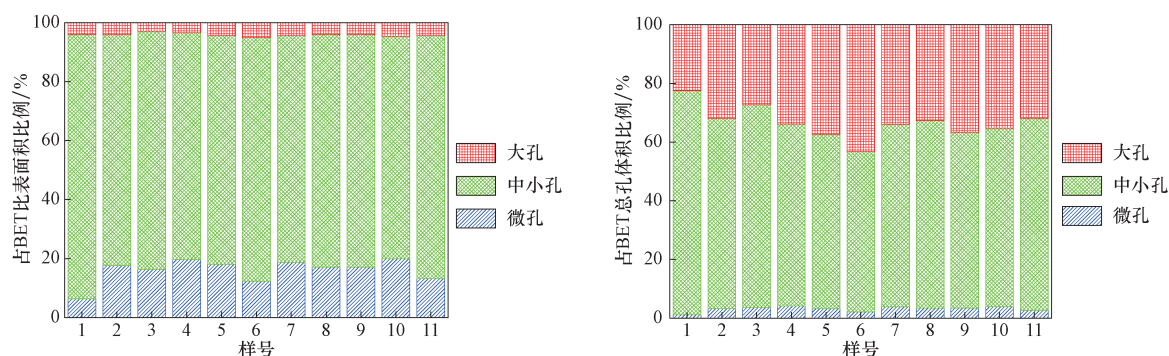


图6 微孔、中小孔和大孔占 BET 比表面积和 BJH 总孔体积百分比

Fig. 6 Proportions of the pore BET specific surface area and BJH total pore volume of large, medium and small nanopores

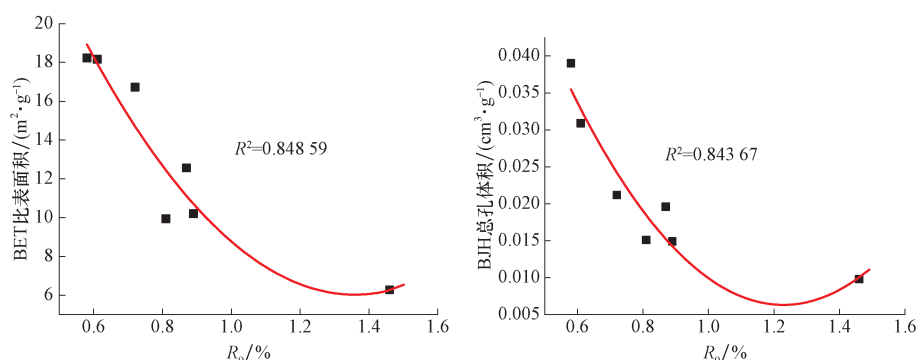
图7 R_o 与 BET 比表面积和 BJH 总孔体积的关系

Fig. 7 Maturity of organic matters vs. BET specific surface area & BJH total pore volume

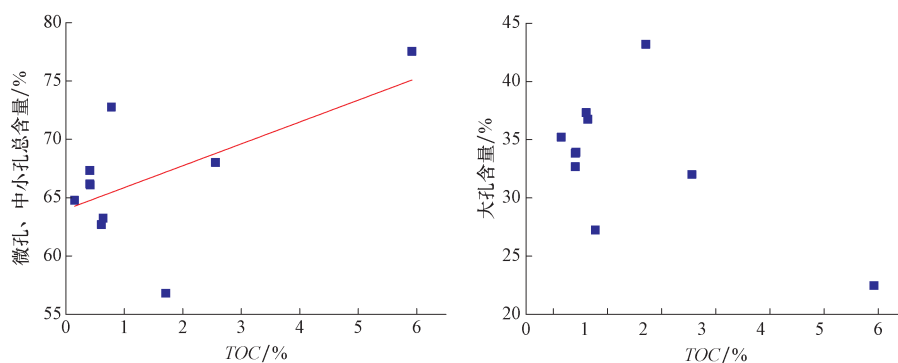


图8 TOC与微孔、中小孔及大孔含量的关系

Fig. 8 Total organic carbon content vs. contents of large, medium and small nanopores

TOC增大,其中的有机孔随之增多,导致微孔和中小孔总量增大,但大孔并未随TOC的增大表现出有规律的变化。这是因为有机孔的发育除了与TOC有关系,还受到有机质类型的影响。图9是样品YLQ-1经过氩离子抛光后的场发射扫描电镜图像,可见相邻的两种有机质内,孔隙发育情况并不相同,上方有机质中发育较多的椭圆形纳米孔隙,而下方有机质中未见明显的特征孔隙发育。因此,仅仅根据TOC来确定孔隙数量的发育情况是不准确的,还应将有机质种类纳入考察范围。

3.3 矿物组分对孔隙发育的影响

图10是韩城矿区和铜川矿区中脆性矿物及粘土矿物含量与孔隙发育情况的关系。虽然两个矿区中同一类型矿物的含量与孔隙含量的拟合曲线存在参数(斜率大小、截距、方差)上的差异,但二者的相关性是一致的,即在两个矿区内,脆性矿物含量与微孔、中小孔的总含量都存在负相关关系,与大孔含量都存在正相关关系;而粘土矿物含量与微孔、中小孔总含量都为正相关关系,与大孔含量都为负相关关系。

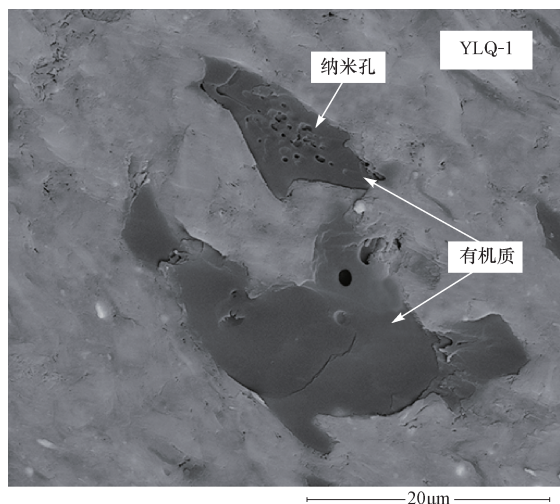


图9 样品YLQ-1经氩离子抛光后的场发射扫描电镜图像

Fig. 9 FE-SEM images of Argon ion milled YLQ-1 sample

与图8相比,矿物组成与孔隙发育的相关性要远好于TOC与它的相关性,因此可以判断,与中国南方多个地区的页岩不同,研究区页岩纳米孔隙发育的主控因素不是TOC,而是矿物组分。脆性矿物中的石英、长石、碳酸盐类矿物等,具有较高的脆性,有利于储层显微裂隙的发育,对大孔含量的贡献大。而粘土矿物脆性低塑性高,矿物常常呈现纤维状、片层状、絮状等形态分布,晶层间极易形成微孔隙,增加微孔、中小孔的含量。但粘土矿物会填充大孔空间,导致大孔含量的减少。

与 R_o 相同,矿物对孔隙发育的控制间接影响到了比表面积和总孔体积的大小。如图11所示,脆性矿物含量与BET比表面积和BJH总孔体积都呈负相关关系,而粘土矿物含量与BET比表面积和BJH总孔体积都呈正相关关系。

4 结论

1) 渭北地区石炭系太原组、二叠系山西组和三叠系延长组泥页岩的孔径绝大部分在2~50 nm,即中小孔含量占绝对优势,平均为63.50%;大孔次之,微孔最少。多数样品的BET比表面积高于10 m²/g,表明研究区页岩孔隙比表面积较大,利于气体的吸附。中小孔对比表面积的贡献作用最大,平均贡献率可达79.83%,微孔次之,平均贡献率为16.05%,大孔平均贡献率仅为4.12%。

2) 泥页岩纳米孔隙结构较为单一,吸附/脱附曲线类型以De Boer分类方案中的B型为主,兼有E型曲线的特征,表明孔隙多为开放型,孔隙类型为狭缝状孔与“墨水瓶”形孔的无规则配置,孔隙的场发射扫描电镜图像证明了这一结论。

3) 矿物组分是本区页岩纳米孔隙发育的主控因素,其中粘土矿物含量的增大会导致微孔、中小孔含量增加,而脆性矿物含量增大会导致大孔含量增加。另外,页岩由低成熟向成熟演化的过程中, R_o 的增大会

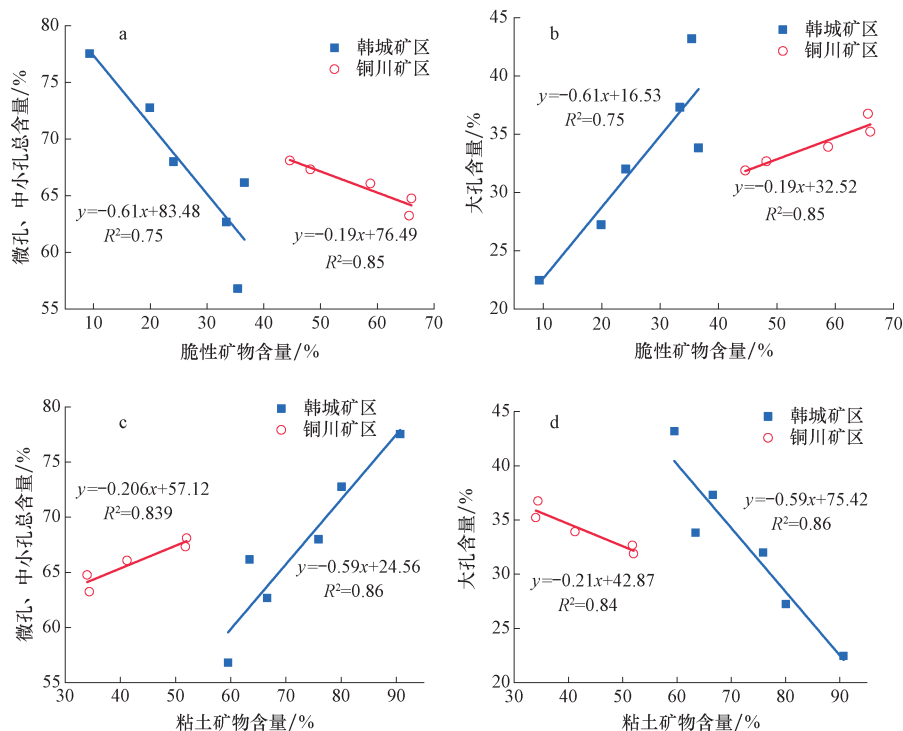


图10 脆性矿物含量、粘土矿物含量与微孔、中小孔及大孔含量的关系

Fig. 10 Contents of brittle minerals and clay minerals vs contents of large, medium and small nanopores

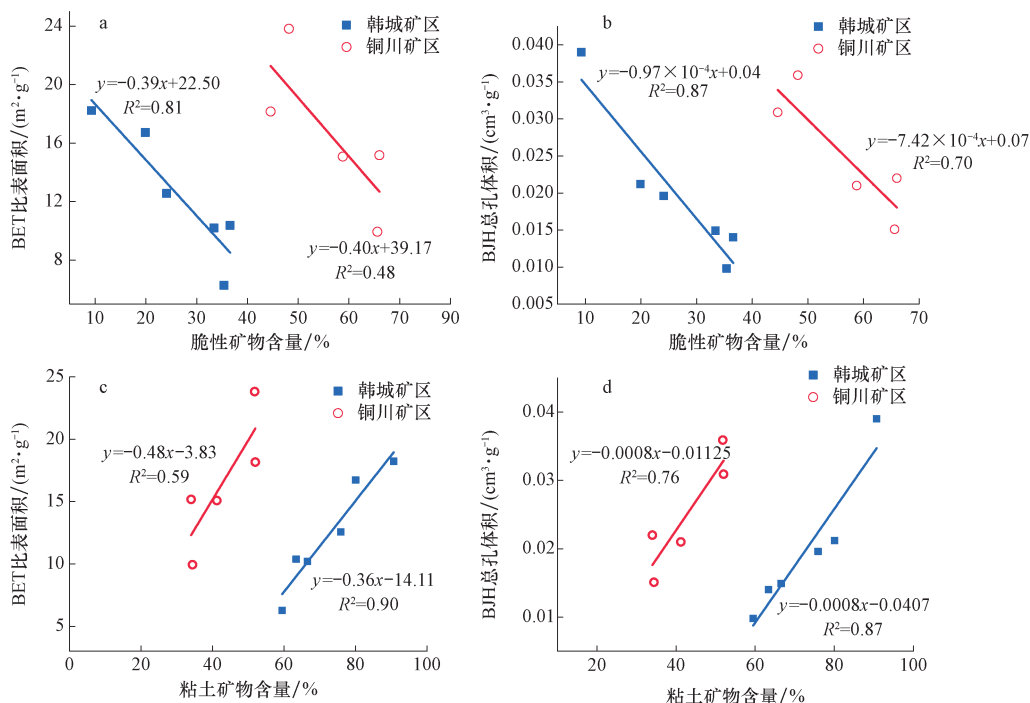


图11 脆性矿物含量、粘土矿物含量与 BET 比表面积和 BJH 总孔体积的关系

Fig. 11 Correlations between brittle minerals, clay minerals contents and BET specific surface area & BJH total pore volume

造成中小孔的减少和大孔的增多,从而使孔隙比表面积和总孔体积减小;有机质孔隙也是微孔、中小孔含量的重要来源之一,因此 *TOC* 的增大本质上导致了微孔、中小孔含量的整体上升。

参 考 文 献

- [1] Ross D J K, Marc Bustin R. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(6): 916–927.
- [2] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale Pores in siliceous mudstones of the Mississippian Barnett Shale [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(12): 848–861.
- [3] Fishman N S, Hackley P C, Lowers H A, et al. The nature of porosity in organic-rich mudstones of the Upper Jurassic Kimmeridge Clay

- Formation, North Sea, offshore United Kingdom [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103(5): 32–50.
- [4] Curtis M E, Cardott B J, Sondergeld C H, et al. Development of organic porosity in the Woodford Shale with increasing thermal maturity [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103: 26–31.
- [5] Slatt R M, O'Brien N R. Pore types in the Barnett and Woodford gas shales; Contribution to understanding gas storage and migration pathways in fine-grained rocks [J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2017–2030.
- [6] Klaver J, Desbois G, Urai J L, et al. BIB-SEM study of the pore space morphology in early mature Posidonia Shale from the Hils area, Germany [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 103: 12–25.
- [7] Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses; Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1099–1119.
- [8] 钟太贤. 中国南方海相页岩孔隙结构特征 [J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 1–4.
- Zhong Taixian. Characteristics of pore structure of marine shales in South China [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 1–4.
- [9] 田华, 张水昌, 柳少波, 等. 压汞法和气体吸附法研究富有机质页岩孔隙特征 [J]. 石油学报, 2012, 33(3): 419–427.
- Tian Hua, Zhang Shuichang, Liu Shaobo, et al. Determination of organic-rich shale pore features by mercury injection and gas adsorption methods [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(3): 419–427.
- [10] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 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, 2012, 37(3): 438–444.
- Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Structure characteristics and accumulation significance of nanopores in Longmaxi shale gas reservoir in the southern Sichuan Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 438–444.
- [11] 房立志, 据宜文, 王国昌, 等. 华夏陆块西南坳陷二叠系含有机质页岩组成及赋气孔隙特征 [J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 229–239.
- Fang Lizhi, Ju Yiwen, Wang Guochang, et al. Composition and gas-filled pore characteristics of Permian organic shale in southwest Fujian depression, Cathaysia landmass [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 229–239.
- [12] 武景淑, 于炳松, 张金川, 等. 渝东南渝页1井下志留统龙马溪组页岩孔隙特征及其主控因素 [J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 260–269.
- Wu Jingshu, Yu Bingsong, Zhang Jinchuan, et al. Pore characteristics and controlling factors in the organic-rich shale of the Lower Silurian Longmaxi Formation revealed by samples from a well in southeastern Chongqing. Earth Science Frontiers, 2013, 20(3): 260–269.
- [13] 叶玥豪, 刘树根, 孙玮, 等. 上扬子地区上震旦统—下志留统黑色页岩微孔隙特征 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(6): 575–582.
- Ye Yuehao, Liu Shugen, Sunwei, et al. Micropore characteristics of Upper Sinian-Lower Silurian black shale in upper Yangtze area of China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2012, 39(6): 575–582.
- [14] 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微孔隙结构特征 [J]. 石油学报, 2013, 34(2): 301–311.
- Yang Feng, Ning Zhengfu, Hu Changpeng, et al. Characteristics of microscopic pore structures in shale reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(2): 301–311.
- [15] 韩双彪, 张金川, 杨超, 等. 渝东南下寒武页岩纳米级孔隙特征及其储气性能 [J]. 煤炭学报, 2013, 38(6): 1038–1043.
- Han Shuangbiao, Zhang Jinchuan, Yang Chao, et al. The characteristics of nanoscale pore and its gas storage capability in the Lower Cambrian shale of southeast Chongqing [J]. Journal Of China Coal Society, 2013, 38(6): 1038–1043.
- [16] 韩双彪, 张金川, Brian Horsfield, 等. 页岩气储层孔隙类型及特征研究: 以渝东南下古生界为例 [J]. 地学前缘, 2013, 20(3): 247–253.
- Han Shuangbiao, Zhang Jinchuan, Brian Horsfield, et al. Pore types and characteristics of shale gas reservoir: A case study of Lower Paleozoic shale in Southeast Chongqing [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(3): 247–253.
- [17] 刘大锰, 李俊乾, 李紫楠. 我国页岩气富集成藏机理及其形成条件研究 [J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 66–70.
- Liu Dameng, Li Junqian, Li Zinan. Research on enrichment and accumulation mechanism of shale gas and its formation conditions in China [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9): 66–70.
- [18] 谢灏辰, 于炳松, 曾秋楠, 等. 鄂尔多斯盆地延长组页岩有机碳测井解释方法与应用 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 731–736.
- Xie Haochen, Yu Bingsong, Zeng Qiunan, et al. TOC logging interpretation method and its application to Yanchang Formation shales, the Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 731–736.
- [19] 耳闯, 赵靖舟, 白玉彬, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征 [J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 708–716.
- Er Chuang, Zhao Jingzhou, Bai Yubin, et al. Reservoir characteristics of the organic-rich shales of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 708–716.
- [20] 涂乙, 邹海燕, 孟海平, 等. 页岩气评价标准与储层分类 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(1): 153–158.
- Tu Yi, Zou Haiyan, Meng Haiping, et al. Evaluation criteria and classification of shale gas reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 153–158.
- [21] Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, et al. Recommendations for the characterization of porous solids [J]. International Union of Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(8): 1739–1758.
- [22] 严继民, 张启元. 吸附与聚集 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 108–120.
- Yan Jimin, Zhang Qiyuan. Adsorption and aggregation [M]. Beijing: Science Press, 1979: 108–120.

(编辑 董立)