

# 滇黔北地区筇竹寺组高演化页岩气储层 微观孔隙特征及其控制因素

梁 兴<sup>1</sup> 张廷山<sup>2</sup> 杨 洋<sup>2</sup> 张 朝<sup>1</sup> 龚齐森<sup>2</sup> 叶 熙<sup>1</sup> 张介辉<sup>1</sup>

1. 中国石油浙江油田公司 2. “油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油大学

梁兴等. 滇黔北地区筇竹寺组高演化页岩气储层微观孔隙特征及其控制因素. 天然气工业, 2014, 34(2): 18-26.

**摘 要** 页岩气钻探资料表明, 滇黔北地区下寒武统筇竹寺组页岩储层富气状况明显不如下志留统龙马溪组页岩, 由此严重影响其勘探部署决策, 查明其原因是当务之急。为此, 以页岩气钻井岩心为基础, 采用环境扫描电镜、原子力显微镜、比表面积测量、低温液氮吸附等试验手段, 分析了筇竹寺组页岩储层的微观孔隙类型、结构特征等。结果表明: ①筇竹寺组页岩储层呈现出极为发育的以纳米级为主的微观孔隙结构特征, 发育黏土矿物层间孔、有机质孔、晶间孔、矿物铸模孔、次生溶蚀孔等多类型的基质孔隙, 具有比表面积小和面孔率大的特点; ②TOC、干酪根类型、黏土矿物和  $R_o$  是控制筇竹寺组微观孔隙结构的主要因素, 以  $R_o$  的影响最为明显, 且在页岩达到过成熟状态后, 其比表面积和孔体积随着  $R_o$  的增大而急剧减小。结论认为: 已处于过成熟中后期的该区筇竹寺组页岩层, 长期的地质作用过程和过高热演化程度严重制约了其微观孔隙发育, 呈现微孔隙骤减和比表面积、孔体积明显较小的情形, 不利于页岩气的吸附储集, 由此导致该区筇竹寺组页岩气富集程度不如龙马溪组的结果。

**关键词** 滇黔北地区 页岩气 储集空间类型 微观孔隙结构 主控因素 富气程度 早寒武世 比表面积

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2014.02.003

## Microscopic pore structure and its controlling factors of overmature shale in the Lower Cambrian Qiongzhusi Fm, northern Yunnan and Guizhou provinces of China

Liang Xing<sup>1</sup>, Zhang Tingshan<sup>2</sup>, Yang Yang<sup>2</sup>, Zhang Zhao<sup>1</sup>, Gong Qisen<sup>2</sup>, Ye Xi<sup>1</sup>, Zhang Jiehui<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Oilfield Company, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation // Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610050, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 34, ISSUE 2, pp.18-26, 2/25/2014. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

**Abstract:** Drilling data reveal that shale gas potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Fm is obviously poorer than that of the Lower Jurassic Longmaxi Fm in northern Yunnan and Guizhou provinces of China, the reason of which will be urgently discovered to make further exploration decision. Therefore, various testing methods such as environmental scanning electronic microscope (ES-EM), atomic force microscope (AFM), the pore specific surface area measurement, and isothermal adsorption/desorption experiments were used to analyze microscopic pore types and pore structures of the shale cores. The following results were obtained. First, nanopores are well developed in the Qiongzhusi shale where the types of matrix pores include interclay mineral pores, organic pores, inter-crystalline pores, mineral moldic pores, and secondary dissolution pores, featured by a small specific surface area and large surface porosity. Second, the main factors controlling the microscopic pore structure there are organic content (TOC), kerogen type, types and content of clay minerals, and thermal maturity ( $R_o$ ), among which thermal maturity is the most significant. At the overmature stage, the specific surface area and pore volume decrease sharply with the increase of thermal maturity. In conclusion, the reason for the revelation from the drilling data in the study area is that after a long period of geological process and rather high thermal evolution, microscopic pore structure characteristics such as a sharp decrease of micropores, the significantly reduced pore volume and pore specific surface area, etc. are unfavorable for gas adsorption and accumulation in the overmature Qiongzhusi shale.

**Keywords:** Northern Yunnan and Guizhou provinces, shale gas, reservoir space types, microscopic pore structure, main controlling factor, gas potential, Early Permian, specific surface area

**基金项目:** 国家油气重大专项(编号:2012ZX05018-006)、博士学科点专项科研基金(优先发展领域)(编号:20125121130001)、国家自然科学基金青年基金(编号:41302123)、中国石油天然气集团公司重大专项(编号:2012F-47-02)。

**作者简介:** 梁兴, 1965年生, 教授级高级工程师, 工学博士, 本刊第七届编委会委员; 主要从事页岩气、煤层气、高凝油和常规气综合评价及勘探开发管理工作。地址: (310023) 浙江省杭州市留下街道荆山岭。E-mail: liangx85@petrochina.com.cn

扬子板块及其周缘下寒武统筇竹寺组黑色、灰黑色泥页岩,是华南地区海相地层的优质烃源岩之一,具有良好的生烃潜力和页岩气资源潜力<sup>[1-5]</sup>。滇黔北地区大地构造上属于扬子板块构造域西南边缘,其筇竹寺组具备良好的页岩气成藏条件,资源潜力较大。近年来,国内许多学者对页岩气赋存状态<sup>[6-8]</sup>、成藏条件<sup>[2,9-11]</sup>、聚集机理<sup>[12-14]</sup>等进行了研究,但对优质泥页岩沉积环境精细研究、页岩气微观储集空间特征及其发育机理、富气程度等方面的研究相对较少<sup>[5,15]</sup>。

已钻井揭示,扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩层富气程度明显不如下志留统龙马溪组,为查明这种状况的原因,笔者以滇黔北昭通国家级页岩气示范区勘探评价实践成果为基础,开展了高演化页岩气储层综

合研究工作。结合区域背景、沉积微相研究和相关室内测试分析,采用环境扫描电镜<sup>[16-18]</sup>、原子力显微镜<sup>[19-21]</sup>以及比表面积测试等手段相结合的方法,开展了筇竹寺组页岩储层微观孔隙类型、结构特征、定量统计分析,剖析微孔隙发育的控制因素,以便为弄清筇竹寺组泥页岩的储气本质以及页岩气的勘探开发提供有力的保障。

### 1 岩性组合与沉积特征

滇黔北探区地处三省交会的云南昭通、贵州毕节、四川宜宾和泸州区域,大地构造上属于扬子地块构造域西南边缘的滇黔北坳陷,主体为威信凹陷的中西部区域(图1),其北侧为四川盆地(海相古生界构造台坳)。

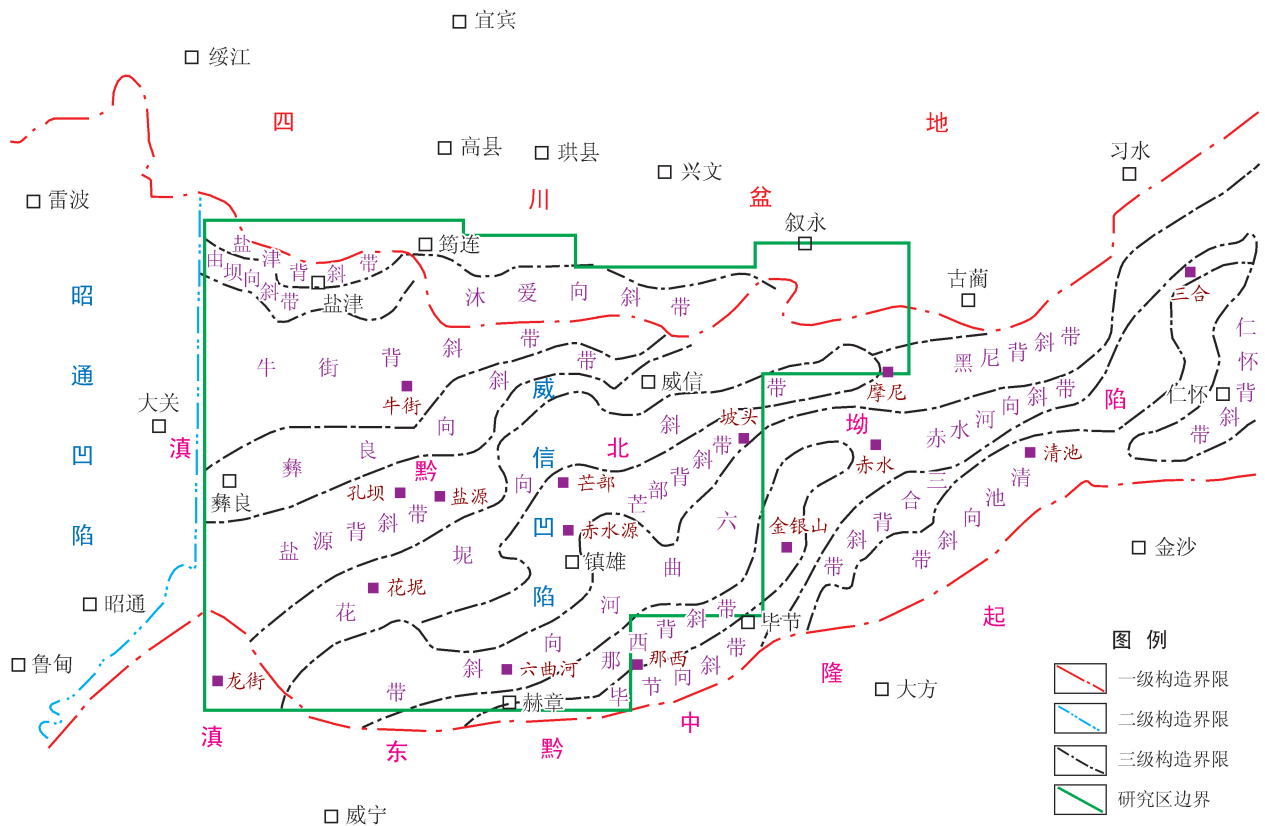


图1 滇黔北探区构造区划图

滇黔北地区寒武系基本上为1套发育齐全、连续沉积的海相地层,自下而上分为下寒武统麦地坪组、筇竹寺组(或牛蹄塘组)、明心寺组、金顶山组和清虚洞组,中寒武统高台组,中上寒武统娄山关群<sup>[3,22]</sup>。

筇竹寺组主要发育灰黑色、暗色泥页岩,最早由刘之远1942年命名。筇竹寺组多与下伏震旦系灯影组呈假整合接触,与上覆明心寺组呈整合接触。按垂向序列,筇竹寺组可分为上下2个岩性段:下段以灰黑—

黑色泥页岩为主,底部见硅质泥页岩;上段颜色明显变浅,灰质、粉砂质含量增加,岩性主要为灰色、深灰色泥页岩。

筇竹寺组沉积早期,为全球海平面快速上升的时期,研究区可容纳空间迅速增大,水体加深,海水处于相对滞留和缺氧的状态,有利于富含有机质的灰黑—黑色泥页岩及碳质泥页岩沉积,沉积厚度介于147~261 m,沉积中心位于云南镇雄—芒部—新场以南地

区,为深水陆棚沉积环境,主要发育厌氧泥质深水陆棚微相沉积,为优质泥页岩发育的最有利相带。筇竹寺组沉积晚期,研究区沉积水体随之变浅且相对富氧,水动力条件相对增强,总体上不利于有机质的形成与保存,以灰—深灰色灰质泥岩和粉砂质泥岩为主,沉积厚度为 67~252 m,主要为浅水陆棚环境。

## 2 页岩微观孔隙结构特征

### 2.1 微观孔隙类型

富有机质泥页岩既可作为烃源岩,又可作为油气储集层<sup>[6,8,10]</sup>。泥页岩“千疮百孔”的内部微结构中存

在着大量不同类型的微观孔隙,微孔的形状、大小、连通性等不同状况对油气聚集有着重要的控制作用<sup>[23]</sup>。

根据 IUPAC 的划分方案<sup>[24-25]</sup>,按孔隙大小可将滇黔北地区筇竹寺组泥页岩微观孔隙,划分为微孔(小于 10 nm)、小孔(10~100 nm)、中孔(100~1 000 nm)和大孔(大于 1 000 nm)<sup>[26]</sup>;按成因,可将基质孔隙区分为矿物间微孔、有机质孔、晶间孔、矿物铸模孔、次生溶蚀孔等(图 2),这类孔隙分别代表了不同成因类型及不同大小。在所有微观孔隙中,微孔隙对页岩气储集空间的贡献最大,而小孔和大孔,则分别可能为泥页岩毛细凝结、扩散和渗流、层流的主要区域<sup>[26]</sup>。

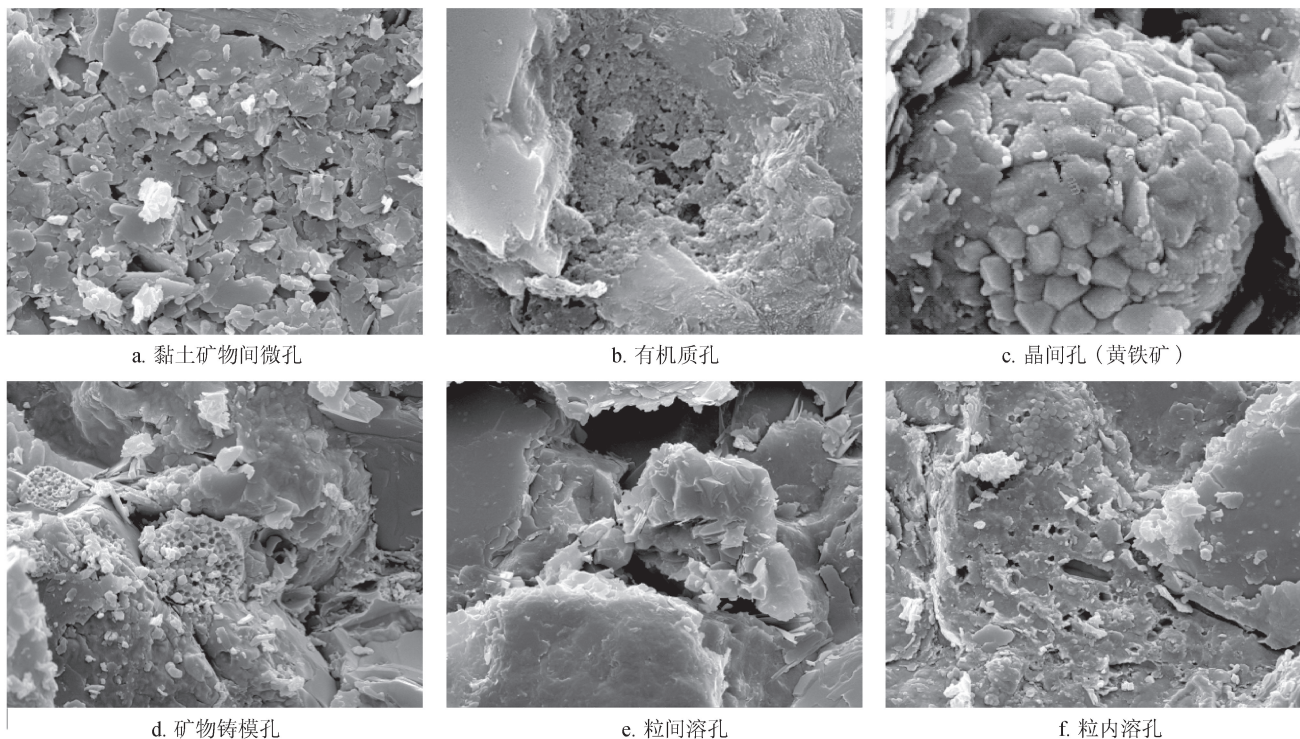


图 2 滇黔北探区 A 井筇竹寺组页岩微观孔隙类型图

### 2.2 比表面积及孔体积特征

比表面积测量方法,是在液氮域温度下对泥页岩注入氮气( $N_2$ )并使其达到饱和状态,而后在室温下进行脱附。鉴于吸附量与泥页岩微孔的发育情况有着密切的联系,因此,可以通过脱附  $N_2$  的数量来进行比表面积的测量,同时还用来计算孔体积和孔径分布,研究微孔隙结构特征<sup>[15,27]</sup>。

对滇黔北 A 井筇竹寺组泥页岩样品进行了比表面积测量和孔径在 1.5~300.0 nm 样品的孔体积测试,得出筇竹寺组页岩气储层的比表面积为 1.915~7.691  $m^2/g$ ,平均为 5.185  $m^2/g$ ;孔体积为 0.005 1~0.010 8 mL/g,平均为 0.008 0 mL/g;平均孔径为 5.38

~10.85 nm,反映筇竹寺组泥页岩的比表面积和孔体积均较大,有利于页岩气的吸附。从中也可以看出,其孔比表面积与孔体积二者之间具有较好的正相关性,即随着比表面积的增大,孔体积也随之增大(图 3-a、3-b)。与之相反,比表面积、孔体积与平均孔径则呈负相关性,即比表面积、孔体积均随孔径的增大而减小(图 3-c、3-d),且当孔径小于 10 nm 时,孔体积分布曲线很陡,而当孔径大于等于 10 nm 时,曲线则逐渐变得平缓,说明孔径范围在 1~8 nm 内的孔隙对泥页岩比表面积、孔体积值的贡献最大(图 3-e),即小孔隙越发育,页岩的比表面积、孔体积越大,越有利于泥页岩对页岩气的吸附聚集。

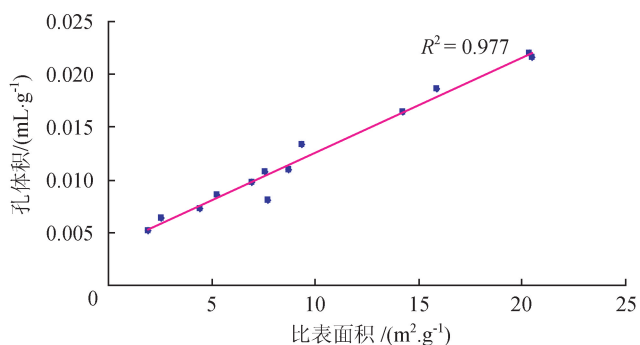
吸附与脱附分析试验结果表明,筇竹寺组泥页岩

样品的低温液氮吸附、脱附曲线形态特征基本相同,具有以下特征:①吸附曲线在下,脱附曲线在上,随相对压力的增大而均处于缓慢上升状态;②在相对压力接近于1时,吸、脱附曲线上速度加快;③吸附回线出现在相对压力在0.4~1.0范围内;④在相对压力接近于0.5时,脱附曲线上出现了明显的拐点,致使脱附曲

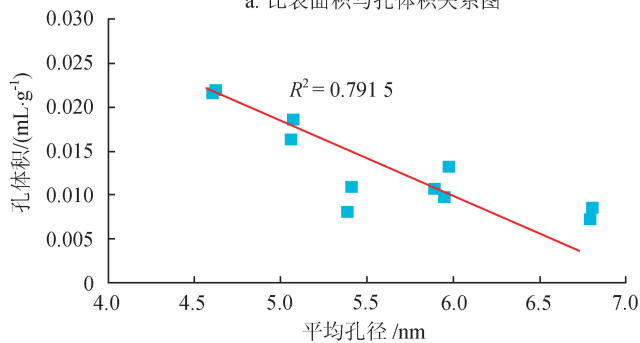
线近乎陡直下降(图3-f)。

### 2.3 微观孔隙定量统计

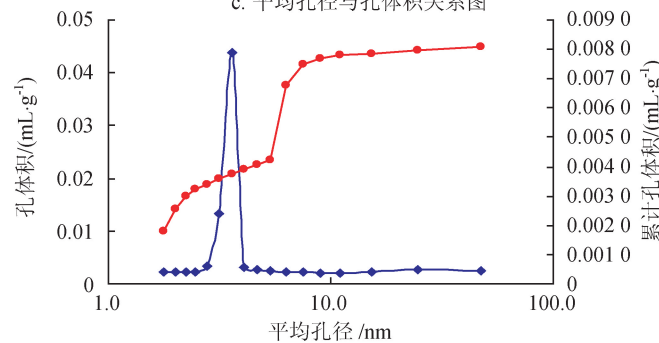
通过低温液氮吸附试验法,可以对孔径范围在1.5~300.0 nm的泥页岩部分微观孔隙进行定量统计,但是对于孔径大于300 nm的微观孔隙的量化还需借助其他的手段。张廷山等提出通过环境扫描电镜和



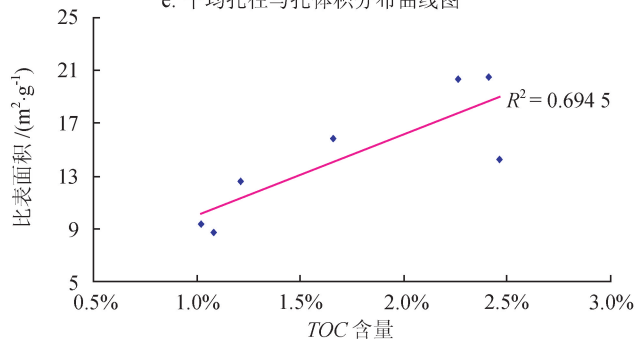
a. 比表面积与孔体积关系图



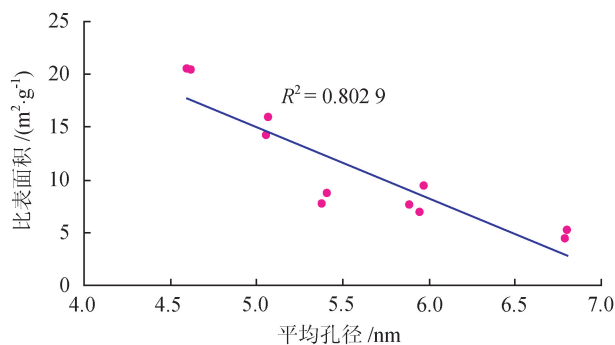
c. 平均孔径与孔体积关系图



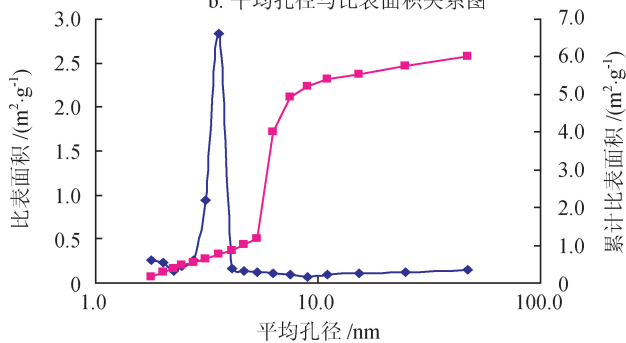
e. 平均孔径与孔体积分布曲线图



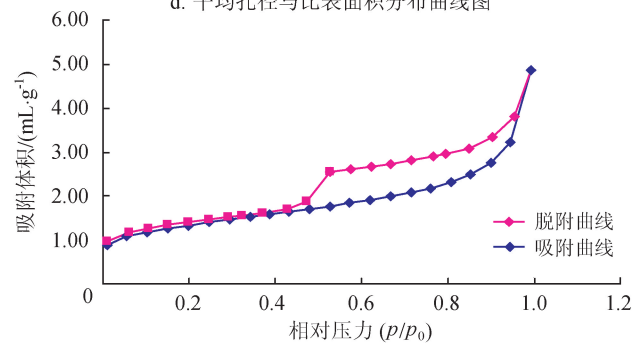
g. 比表面积与 TOC 含量关系图



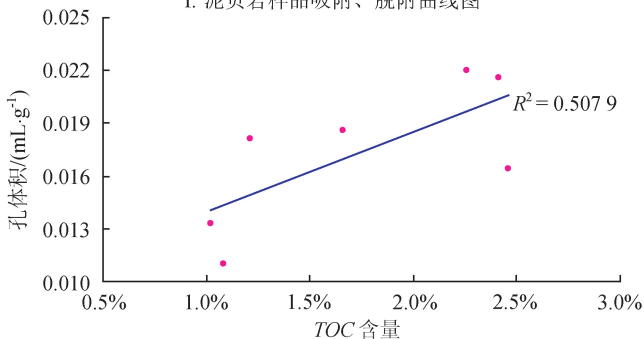
b. 平均孔径与比表面积关系图



d. 平均孔径与比表面积分布曲线图



f. 泥页岩样品吸附、脱附曲线图



h. 孔体积与 TOC 含量关系图

图3 滇黔北探区 A 井筇竹寺组泥页岩比表面积、孔体积及平均孔径间关系图

原子力显微镜相结合的方法,辅助利用 ArcGIS 定量统计工具,可以计算出微观孔隙的孔隙数量、孔隙面积、面孔率等<sup>[26]</sup>。

通过将 A 井筇竹寺组具有代表性的页岩岩心抛光样品进行 AFM 和 SEME 图像处理与分析,将图像数据导入 ArcGIS 平台中进行栅格重分类分析,图像中白色区域为孔隙或裂隙分布区(图 4-d、4-e)。由此

计算出不同样品中微观孔隙的孔隙数量及其面孔率(表 1)。与龙马溪组页岩相比,筇竹寺组页岩具有微观孔隙数量多、孔径小、单孔面积小、面孔率大的特征。由 AFM 剖面图清晰地显示出,规则排列的栅格间为纳米级孔隙,具有锯齿状紧密排列的结构特征(图 4-a、4-c),这种规则的呈明暗相间的栅格状表面形态特征可能是页岩中干酪根大分子团紧密排列的结果<sup>[27-28]</sup>。

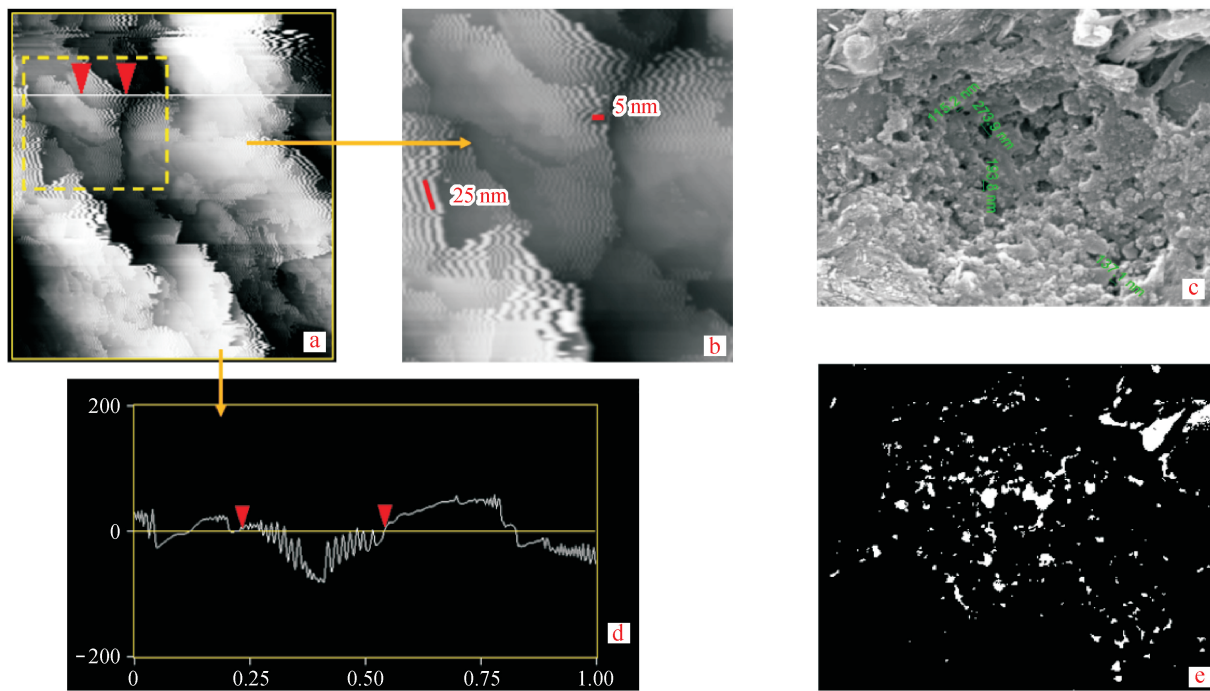


图 4 滇黔北 A 井筇竹寺组 SEME 与 AFM 图像处理结果图

注:a.为筇竹寺泥页岩大分子团栅状排列结构 AFM 图像;b.为 a 的局部放大图像,白色为大分子团纳米线状结构;c.大分子团剖面分析结果;d.为筇竹寺组孔隙 SEME 处理图像;e.图像中白色部分为孔隙分布区域

表 1 滇黔北探区 A 井筇竹寺组和龙马溪组页岩微观孔隙定量分析结果表

样品编号	层位	总孔隙数/ 个	平均孔隙 面积/nm <sup>2</sup>	最小孔隙 面积/nm <sup>2</sup>	最大孔隙 面积/nm <sup>2</sup>	总孔隙 面积/μm <sup>2</sup>	面孔率	扫描面积/ μm <sup>2</sup>
QZS 1	筇竹寺组	254	4 016	172	122 069	1.020	4.575%	22.295
QZS 2	筇竹寺组	194	5 583	167	119 620	1.083	4.582%	22.295
LMX 1	龙马溪组	34	11 692	161	151 744	0.398	1.824%	22.295
LMX 2	龙马溪组	160	19 659	1 024	497 888	3.145	2.257%	22.295
LMX 3	龙马溪组	275	13 380	1 080	368 160	3.679	2.641%	22.295

### 3 微观孔隙发育控制因素分析

泥页岩微观孔隙的发育演化,不是受单一的条件控制,而是岩性、矿物组合、温压等多方面因素影响的综合体<sup>[5,26]</sup>。有机碳含量、干酪根类型、黏土矿物与含量、热演化程度等因素,均不同程度地控制着泥页岩微观孔隙的发育<sup>[26]</sup>。通过各类分析化验的对比研究发

现,滇黔北高演化区筇竹寺组泥页岩微观孔隙的发育演化也与上述因素有着密切的关系。

#### 3.1 有机碳含量

泥页岩微观孔隙的发育程度与有机碳含量关系密切。在富含有机质的页岩中,其比表面和孔体积相对较大,其平均孔径一般小于无机黏土的平均孔径<sup>[28]</sup>。研究区筇竹寺组泥页岩样品在热演化程度、黏土矿物

类型与含量等条件相近时,表现为有机碳含量高的样品的比表面积、孔体积均较大(表2),且比表面积、孔

体积与 TOC 均具有较好的正相关性(图 3-g、3-h)。说明在其他条件相近时,TOC 为影响泥页岩比表

表2 滇黔北探区 A 井筇竹寺组和龙马溪组页岩微观孔隙发育的综合因素对比表

层位	样品编号	TOC	$R_o$	黏土矿物含量	干酪根类型	比表面积/ ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )	总孔体积/ ( $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$ )	平均孔径/ nm
筇竹寺组	QZS 1	0.81%	3.89%	19%	腐泥	2.548	0.006 4	10.24
	QZS 2	0.82%	4.12%	20%	腐泥	1.915	0.005 1	10.85
	QZS 3	1.86%	4.03%	26%	腐泥	5.225	0.008 6	6.80
	QZS 4	1.13%	4.06%	30%	腐泥	4.414	0.007 3	6.79
	QZS 5	1.66%	4.14%	30%	腐泥	6.929	0.009 8	5.95
	QZS 6	1.72%	4.06%	27%	腐泥	7.691	0.008 1	5.38
	QZS 7	2.13%	4.22%	32%	腐泥	7.571	0.010 8	5.89
龙马溪组	LMX 1	1.21%	2.56%	43%	偏腐泥混合	12.598	0.018 1	5.87
	LMX 2	1.08%	3.75%	16%	偏腐泥混合	8.691	0.011 0	5.41
	LMX 3	1.02%	2.64%	52%	偏腐泥混合	9.363	0.013 3	5.97
	LMX 4	1.66%	2.78%	40%	偏腐泥混合	15.869	0.018 6	5.07
	LMX 5	2.26%	2.93%	49%	偏腐泥混合	20.357	0.022 0	4.62
	LMX 6	2.41%	2.99%	55%	偏腐泥混合	20.463	0.021 6	4.60
	LMX 7	2.46%	3.21%	20%	偏腐泥混合	14.225	0.016 4	5.06

面、孔体积的主要因素。

### 3.2 干酪根类型

不同类型的干酪根对页岩微观孔隙发育程度有着一定的影响,干酪根由混合型到腐泥型,泥页岩的比表面积和孔体积均减小<sup>[26]</sup>。选择有机碳含量、热演化程度等条件相近,干酪根类型不同的几组样品,通过对比发现,该区也具有相似的特征和变化规律。即偏腐泥混合型干酪根页岩中的微观孔隙的比表面积和孔体积大于含腐泥型干酪根页岩中微观孔隙的比表面积和孔体积(表2)。其原因可能是偏腐泥混合型干酪根有来源于较高等的浮游生物,与低等菌藻类生物相比,其内部结构较大且复杂,致使页岩微观孔隙空间也有所增大,进而对页岩的比表面、孔体积等也造成了一定的影响。但是,由于地质层位不同,所经历的地质作用存在差异,影响因素众多,这种简单的表象对比结果仅作参考,分析的原因是值得借鉴的。

### 3.3 黏土矿物类型与含量

泥页岩的比表面积、孔体积与黏土矿物关系密切。不同类型的黏土矿物具有不同的比表面积,在绿泥石、伊利石和蒙脱石3种黏土矿物中,蒙脱石的比表面积最大,可达到800 mL/g,伊利石和绿泥石都较小,分别只有30 mL/g和15 mL/g<sup>[29-31]</sup>。因此,不同类型的黏土矿物组合,其比表面积与孔体积也存在差异。通过研究发现,该区筇竹寺组页岩与志留系龙马溪组页岩相比,具有较大比表面积的蒙脱石、伊利石含量减小,

相反具有较小比表面积的高岭石、绿泥石含量增大。因此,龙马溪组泥页岩样品的比表面积、孔体积明显大于筇竹寺组泥页岩样品的比表面积、孔体积。由此说明,黏土矿物(类型与含量)对泥页岩比表面积、孔体积也存在着一程度的影响。

### 3.4 热演化程度

页岩的微观孔隙结构与热演化程度之间的关系较为复杂,并不是单纯的正相关或者负相关之关系。这是因为热演化程度不仅会造成有机质中孔隙结构的变化,同时还会引起黏土矿物的转化,造成了黏土矿物之间微孔隙比表面积的改变,从而改变了页岩的比表面积和孔体积。

#### 3.4.1 热演化程度对有机质孔隙结构的影响

通过对研究区具有高热演化程度泥页岩样品的分析发现,当 TOC 相近时,有机质热演化程度在一定范围内,随着  $R_o$  的增高,比表面积和孔体积均增大。究其原因,可能为热演化程度对有机质孔隙的发育有着决定性的影响,即有机质在热解生烃过程中,随着热演化程度的增大,有机质孔隙结构会发生变化,小孔和微孔的数量将增多,从而增大了有机质孔隙的比表面积和孔体积<sup>[32]</sup>,以致页岩储层的比表面积和孔体积也大大地增大。

#### 3.4.2 热演化程度对黏土矿物间微孔隙结构的影响

热演化程度除了影响着有机质孔隙的发育外,同时还对黏土矿物间微孔隙的发育起着很大作用,其影

响机理主要是通过影响黏土矿物类型与含量,进而实现对黏土矿物间微孔隙造成影响。通常随着  $R_o$  的增大,黏土矿物中具有大比表面积的蒙脱石含量降低,相继转化为伊/蒙混层矿物,而间层矿物含量由多逐渐减少,最终全部转化为伊利石或绿泥石,在此过程中黏土矿物间微孔隙比表面积和孔体积大大降低<sup>[29-31,33-35]</sup>。

研究区筇竹寺组页岩热演化程度较高, $R_o$  均大于 3.0%。根据岩心不同黏土矿物含量随  $R_o$  的变化关系图(图 5)可以看出,随  $R_o$  的增大,具有较大比表面积的伊利石含量增大、伊/蒙混层含量减少,具有较小比表面积的绿泥石含量增大、高岭石含量增大。而上覆的龙马溪组页岩热演化程度相对低些( $R_o$  多小于

3.0%),与筇竹寺组页岩黏土矿物相比,其伊利石含量高(13%~36%)、伊/蒙混层含量比较少(2%~6%)、绿泥石含量高(13%~32%)、高岭石含量高(6%~9%)。因而出现了筇竹寺组黏土矿物间微孔隙的比表面积和孔体积远比龙马溪组小的情形,导致其比表面积和孔体积均较小的状况(表 2)。因此,热演化程度通过对黏土矿物类型与含量的影响,也同样控制着黏土矿物间微孔隙的发育程度。由此得出,已处于过成熟中期后的滇黔北筇竹寺组页岩层,经历悠久的地质作用过程和过高热演化程度严重制约了其微孔隙结构特征,呈现微孔隙骤减和比表面积、孔体积明显较小的情形,不利于页岩气的吸附储集,结果出现筇竹寺组页岩气富集程度不如龙马溪组的状况。

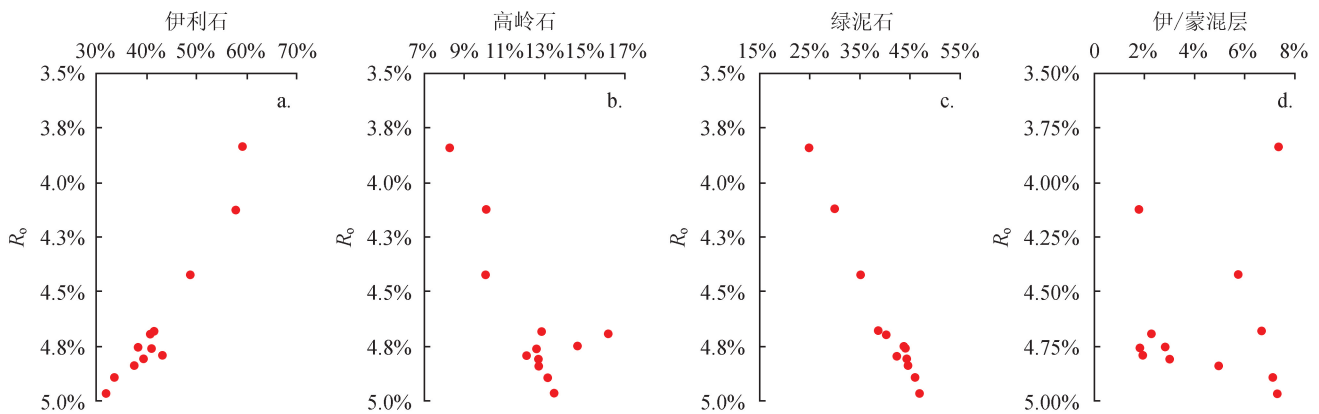


图 5 滇黔北探区 A 井筇竹寺组页岩黏土矿物(类型与含量)随  $R_o$  变化关系图

## 4 结论

以页岩气钻井岩心观察描述与分析试验为基础,结合区域地质剖面研究,认为筇竹寺组富含有机质的优质泥页岩主要形成于厌氧泥质深水陆棚相带。利用环境扫描电镜、原子力显微镜及比表面积测量等多试验手段,能清晰地观测到筇竹寺组页岩储层具有孔径大小和成因的多样性,呈现极为发育的以纳米级为主的微孔隙结构特征,发育黏土矿物层间孔、有机质孔、晶间孔、矿物铸模孔、次生溶蚀孔等多类型的基质微孔隙。

1)液氮吸附实验结果表明:筇竹寺组泥页岩比表面积和孔体积均较大,并具有良好的正相关性,主要发育小于 10 nm 的小孔,孔径范围在 1~8 nm 的孔隙对比表面积、孔体积的贡献最大。

2)采用比表面积与孔体积测试、扫描电镜、原子力显微镜相分析相结合的方法和 ArcGIS 统计工具,发现筇竹寺组泥页岩微孔隙具有数量多、面孔率大、孔比

表面积较大的特点。

3)筇竹寺组页岩气储层微观孔隙发育演化主要受控于 TOC、干酪根类型、黏土矿物类型与含量、热演化程度等因素。其中以热演化程度的影响最为明显,在页岩达到过成熟状态后其比表面积和孔体积急剧减小,影响了页岩气的吸附储集能力。

## 参 考 文 献

- [1] 张春明,张维生,郭英海,等.川东南—黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响[J].地学前缘,2012,19(1):136-145.  
ZHANG Chunming, ZHANG Weisheng, GUO Yinghai, et al. Sedimentary environment and its effect on hydrocarbon source rocks of Longmaxi Formation in Southeast Sichuan and Northern Guizhou[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 136-145.
- [2] 董大忠,程克明,王玉满,等.中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J].石油与天然气地质,2010,31(3):288-299.

- DONG Dazhong, CHENG Keming, WANG Yuman, et al. Forming conditions and characteristics of shale gas in the Lower Paleozoic of the Upper Yangtze region, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(3): 288-299.
- [3] 胡琳, 朱炎铭. 中上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩气资源潜力分析[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(11): 1871-1877.
- HU Lin, ZHU Yanming. Resource potential analysis of shale gas in Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in Middle & Upper Yangtze region[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(11): 1871-1877.
- [4] 王道富, 高世葵, 董大忠, 等. 中国页岩气勘探开发挑战初论[J]. *天然气工业*, 2013, 33(1): 8-17.
- WANG Daofu, GAO Shikui, DONG Dazhong, et al. A primary discussion on challenges for exploration and development of shale gas resources in China[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(1): 8-17.
- [5] 王道富, 王玉满, 董大忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气储集空间定量表征[J]. *天然气工业*, 2013, 33(7): 1-10.
- WANG Daofu, WANG Yuman, DONG Dazhong, et al. Quantitative characterization of reservoir space in the Lower Cambrian Qiongzhusi Shale, Southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(7): 1-10.
- [6] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. *现代地质*, 2003, 17(4): 466.
- ZHANG Jinchuan, XUE Hui, ZHANG Deming, et al. Shale gas and its accumulation mechanism[J]. *Geoscience*, 2003, 17(4): 466.
- [7] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. *天然气工业*, 2008, 28(2): 151-156.
- ZHANG Jinchuan, NIE Haikuang, XU Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(2): 151-156.
- [8] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. *天然气工业*, 2004, 24(7): 15-18.
- ZHANG Jinchuan, JIN Zhijun, YUAN Mingsheng. Accumulation mechanism and distribution of shale gas[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(7): 15-18.
- [9] 程克明, 王世谦, 董大忠, 等. 上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J]. *天然气工业*, 2009, 29(5): 40-44.
- CHENG Keming, WANG Shiqian, DONG Dazhong, et al. Accumulation conditions of shale gas reservoirs in lower Cambrian Qiongzhusi Formation, the Upper Yangtze region[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 40-44.
- [10] 范昌育, 王震亮. 页岩气富集与高产的地质因素和过程[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(5): 465-469.
- FAN Changyu, WANG Zhenliang. Geological factors and process in enrichment and high production of shale gas[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2010, 32(5): 465-469.
- [11] 郭岭, 姜在兴, 姜文利. 页岩气储层的形成条件与储层的地质研究内容[J]. *地质通报*, 2011, 30(2/3): 385-392.
- GUO Ling, JIANG Zaixing, JIANG Wenli. Formation condition of gas-bearing shale reservoir and its geological research target[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(2/3): 385-392.
- [12] 庞雄奇, 李素梅, 金之钧, 等. 排烃门限存在的地质地球化学证据及其应用[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2004, 29(4): 384-390.
- PANG Xiongqi, LI Sumei, JIN Zhijun, et al. Geochemical evidences of hydrocarbon expulsion threshold and its application[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(4): 384-390.
- [13] 刘丽芳, 徐波, 张金川, 等. 中国海相页岩及其成藏意义[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2005: 457-463.
- LIU Lifang, XU Bo, ZHANG Jinchuan, et al. China marine shale and reservoir significance[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2005: 457-463.
- [14] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(4): 392-400.
- LI Xinjing, HU Suyun, CHENG Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(4): 392-400.
- [15] 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. Nanopore structure features and significance of accumulation of shale gas reservoirs in Longmaxi Formation of southern Sichuan[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(3): 438-444.
- [16] MINER M, MCLIN R, PETRIELLO J. Imaging texture and porosity in mudstones and shales: Comparison of secondary and ion-milled backscatter SEM methods[C]// paper 138975-MS presented at the Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 19-21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada. New York: SPE, 2010.
- [17] SONDERGELD C H, AMBROSE R J, RAI C S, et al. Micro-structural studies of gas shales[C]// paper 131771-MS presented at the SPE Unconventional Gas Conference, 23-25 February 2010, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. New York: SPE, 2010.
- [18] SONDERGELD C H, NEWSHAM K E, COMISKY J T, et al. Petrophysical considerations in evaluating producing shale gas resources[C]// paper 131768-MS presented at the SPE Unconventional Gas Conference, 23-25 Febru-



- ary 2010, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. NEW York: SPE, 2010.
- [19] SMITH J R, CHEN A, GOSTOVIC D, et al. Evaluation of the relationship between cathode microstructure and electrochemical behavior of SOFCs[J]. *Solid State Ionics*, 2009, 180(1): 90-98.
- [20] JAVADPOUR F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone)[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2009, 48(8): 16-21.
- [21] 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.
- [22] 刘满仓, 杨威. 四川盆地蜀南地区寒武系地层划分及对比研究[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(1): 101-106.  
LIU Mancang, YANG Wei. Studies on stratigraphic division and correlation in Cambrian in Shunan area of Si-chuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(1): 101-106.
- [23] 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.
- [24] SING K S W, EVERETT D H, HAUL R A W, et al. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to determination of surface area and porosity [J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57(4): 603-611.
- [25] ROUQUEROL F, ROUQUEROL J, SING K S W. Adsorption by powders & porous solids: principles, methodology and applications [M]. London: Academic Press, 1999.
- [26] 张廷山, 杨洋, 龚齐森, 等. 早古生代海相页岩气储层微观孔隙类型, 结构特征及发育控制因素 [EB/OL]. 科技论文在线. [2013-01-18]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201301-28>.  
ZHANG Tingshan, YANG Yang, GONG Qisen, et al. Early Paleozoic marine shale gas reservoir microscopic pore types, structure characteristics and development control factors [EB/OL]. *Science Paper Online*. [2013-01-18]. <http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201301-28>.
- [27] 杜玉娥. 煤的孔隙特征对煤层气解吸的影响 [D]. 西安: 西安科技大学, 2010.  
DU Yu'e. The affect about pore characteristics of coal to the coal-bed methane desorption [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [28] KANG S M, FATHI E, AMBROSE R J, et al. Carbon dioxide storage capacity of organic-rich shales [C] // paper 134583 presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 19-22 September 2010 in Florence, Italy. New York: SPE, 2010.
- [29] 赵杏媛, 张有瑜. 粘土矿物与粘土矿物分析 [M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 43-44.  
ZHAO Xingyuan, ZHANG Youyu. *Clay minerals and its analysis* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1990: 43-44.
- [30] 陆琦, 雷新荣, 刘惠芳. 不规则伊/蒙混层粘土矿物成因类型及晶体化学分类 [J]. *矿物学报*, 1991, 11(2): 97-105.  
LU Qi, LEI Xinrong, LIU Huifang. Irregular illite/smectite interstratified mineral formation types and crystal chemical classification [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1991, 11(2): 97-105.
- [31] 陆琦, 雷新荣, 刘惠芳. 一种不规则伊/蒙混层粘土矿物堆垛序列的研究 [J]. *地质学报*, 1993, 67(2): 123-130.  
LU Qi, LEI Xinrong, LIU Huifang. A study on irregular smectite interstratified clay minerals illite/stacking sequence [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1993, 67(2): 123-130.
- [32] ROSS D J K, BUSTIN R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian Mississippian strata in the Western Canada sedimentary Basin: Application of an integrated formation evaluation [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(1): 87-125.
- [33] 董丙响, 程远方, 刘钰川, 等. 页岩气储层岩石物理性质 [J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 28(1): 25-28, 36.  
DONG Bingxiang, CHENG Yuanfang, LIU Yuchuan, et al. Research of the petrophysical property of shale gas reservoirs [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2013, 28(1): 25-28, 36.
- [34] 朱定伟, 王香增, 丁文龙, 等. 测井资料在优质页岩气储层识别中的应用——以鄂尔多斯盆地东南部长7段黑色页岩为例 [J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 28(2): 25-29, 34.  
ZHU Dingwei, WANG Xiangzeng, DING Wenlong, et al. Application of logging data in the identification of high quality shale gas reservoirs: An example from the Chang-7 black shale in southeastern Ordos Basin [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2013, 28(2): 25-29, 34.
- [35] JARVIE D M, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 475-499.