

湘鄂西地区下志留统龙马溪组页岩吸附能力主控因素

陈康^{1,2}, 张金川^{1,2}, 唐玄^{1,2}, 于京都³, 刘颢^{1,2}, 杨超^{1,2},

[1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 中国地质大学 页岩气勘查与评价国土资源部重点实验室, 北京 100083; 3. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083]

摘要:利用实验测试手段剖析了湘鄂西地区龙马溪组页岩的有机质特征、矿物特征、孔隙特征以及甲烷吸附特征,发现龙马溪组页岩的甲烷吸附能力较强,在恒温30℃时平均饱和吸附气量为2.46 cm³/g,具有良好的储气能力。通过相关性分析,认为有机碳含量、适中的有机质成熟度、干酪根镜质组 and 惰质组含量、黄铁矿含量和微、中孔的体积与吸附能力正相关性较强,是吸附能力主要的内部控制因素。温度和压力作为外部控制因素分别与吸附能力呈负相关和正相关性,而该区构造抬升幅度大,对温度和压力具有较大影响。研究认为,构造抬升对吸附能力的影响具有阶段性特征:当地层在高压区内抬升时,温度对吸附气的影响大于压力对吸附气的影响,构造抬升使得页岩的吸附能力增强;当地层抬升幅度很大、地层进入低压区时,压力对吸附气的影响大于温度对吸附气的影响,会使得吸附气量迅速下降。

关键词:吸附特征;构造抬升;页岩气;龙马溪组;湘鄂西地区

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Main controlling factors on shale adsorption capacity of the Lower Silurian Longmaxi Formation in western Hunan-Hubei area

Chen Kang^{1,2}, Zhang Jinchuan^{1,2}, Tang Xuan^{1,2}, Yu Jingdu³, Liu Yang^{1,2}, Yang Chao^{1,2}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Shale Gas Exploration and Evaluation, Ministry of Land and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Various laboratorial techniques are applied for dissecting the characteristics of the Longmaxi Formation shale in Western Hunan-Hubei Area, including organic carbon, mineral, porosity and methane adsorption. It is found that the Longmaxi Formation shale has good methane adsorption capacity with an average saturated adsorption gas content of 2.46 cm³/g under constant temperature 30℃, thus has favorable gas capacity storage. Correlation analysis reveals that the content of organic carbon, appropriate maturity, contents of vitrinite and inertinite, content of pyrite as well as the volume of micropores and mesopores, as the major internal controlling factors, are positively correlated with gas adsorption capacity, while temperature and pressure, as the external controlling factors, have negative and positive relationships with adsorption capacity, respectively. The tectonic uplifting produced a considerable influence on temperature and pressure due to its relatively high intensity. It is suggested that the influence of tectonic uplifting on adsorption capacity can be divided into two stages. When the strata are uplifted within high pressure zone, the impact of temperature on gas adsorption is greater than that of pressure, enhancing adsorption capacity. In contrast, when the strata enter into low pressure zone due to strong tectonic uplifting, the influence of pressure on gas adsorption is greater than that of temperature, rapidly lowering adsorption capacity.

Key words: adsorption characteristics, tectonic uplift, shale gas, Longmaxi Formation, western Hunan-Hubei area

页岩气是主体以游离态和吸附态赋存在富有机质 暗色泥页岩或其临近的粉砂质泥岩、泥质粉砂岩或粉

收稿日期:2015-06-13;修订日期:2016-01-04。

第一作者简介:陈康(1988—),男,博士研究生,非常规油气地质与地球物理。E-mail:332644734@qq.com。

通讯作者简介:张金川(1964—),男,教授,博士生导师,非常规油气资源评价。E-mail:zhangjc@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41102088)。

砂岩中的一种天然气。为天然气生成后在源岩内原地成藏或短距离运移后就近聚集,是一种重要的非常规天然气藏^[1-4]。页岩气的吸附气以吸附状态大量吸附于有机质颗粒、粘土矿物颗粒以及孔隙表面之上,吸附气含量是评价页岩含气性的关键参数,对计算页岩气资源量和可采储量具有重要的意义。Mavor^[5]、李新景等^[6]认为吸附气含量至少占页岩气总含量的40%,而页岩的吸附能力受诸多因素影响,主要有孔隙结构特征、有机质特征、矿物成分、温度及压力等,不同地区地质条件下页岩的吸附气含量及所占比例不尽相同。

湘鄂西地区是中上扬子海相页岩气勘探开发的重点地区,东起湖北宜昌湖南临澧一线,南到湖南慈利保靖酉阳彭水一线,西达彭水利川团堡一线,北抵鄂境兴山。大地构造上包含中央复背斜、花果坪复向斜、宜都鹤峰复背斜、叠植石门复向斜和秭归复向斜5个次级构造单元^[7]。该地区古生界下志留统龙马溪组发育富含黄铁矿、有机质或生物化石的黑色页岩,页岩厚度大、分布广^[8-10]。湘鄂西地区页岩气的勘探仍处于初期阶段,钻井和测录井资料不多,增加了该区页岩气资源评价的难度,因此进一步研究并揭示龙马溪组页岩的吸附特征并总结出相应的主控因素,对评价湘鄂西地区页岩含气性特征、揭示页岩气富集规律、指导页岩气资源量计算具有理论和实践意义。

1 样品测试及储层特征

为了研究湘鄂西地区龙马溪组页岩的吸附特征及其影响因素,收集了该地区以下志留统龙马溪组为勘探目的层的3口页岩气井的页岩岩心样品12件。3口井分别为LD1井、LC2井和YY1井,目的层深度范围分别为897~948,1 896.6~1 922.0和9.65~532.45 m。对龙马溪组黑色页岩样品进行了有机质类型鉴定、有机质丰度测定、有机质成熟度测定、X-衍射矿物分析、扫描电镜实验、孔渗测定、低温氮吸附孔径分析和等温吸附特征实验等分析测试项目。

1.1 页岩有机质特征

通过干酪根显微组分分析实验,龙马溪组黑色页岩干酪根显微组分中,腐泥组占主要部分,在68%~90%,腐泥组以分散状矿物沥青基质为主,镜质组和惰质组占少部分,缺乏壳质组,整体上有机质类型主要为I-II型,其中LC2井和YY1井以I型为主,LD1井为II₁-II₂型。有机质丰度通过碳硫分析仪测定总有机碳含量(TOC)来表征,龙马溪组的TOC为0.33%~4.18%,主体大于1%,平均为1.33%。由于龙马溪组地层经历过深埋,有机质成熟度较高,镜质组

反射率(R_o)在2.28%~5.25%,主体分布在3.0%以上,平均值为3.13%。

1.2 页岩矿物特征

对3口井的页岩样品进行X-衍射分析,获得岩样的矿物特征,结果表明湘鄂西龙马溪组页岩储层矿物成分以粘土矿物和石英为主,粘土矿物占15.20%~49.60%,平均为29.95%。碎屑矿物中的石英含量占32.7%~66.0%,平均为45.7%,其次为长石,占4.0%~21.90%,平均为13%,还有部分方解石和白云石等碳酸盐岩矿物和少量黄铁矿、菱铁矿。粘土矿物以伊利石和伊/蒙混层为主,含少量的绿泥石和高岭石,不含蒙皂石。伊利石含量17%~65%,平均值为42.8%。伊蒙混层含量24%~73%,平均值为44%。绿泥石含量3%~21%,平均值为12.5%。

1.3 页岩孔隙特征

利用孔隙度分析仪和低温氮吸附实验对取心岩样孔隙结构特征进行了测试,测得有效孔隙度为0.12%~1.80%,平均值为0.80%,总体孔隙度较低。总孔体积为0.001~0.044 cm³/g,平均值为0.001 5 cm³/g。平均比表面积为5.35~15.59 m²/g,平均值为11.33 m²/g。孔径为3.48~22.79 nm,平均值为4.08 nm。其中YY1井的孔隙度、总孔体积、比表面积和平均孔径相对整体偏高。测试结果表明该地区页岩岩样的孔隙直径主要分布于0~8 nm,按照IUPAC分类标准(孔隙度大于50 nm为大孔,孔隙度介于2~50 nm为中孔,孔隙度小于2 nm为微孔),该地区页岩孔隙类型以中孔为主,其次为微孔和大孔。中孔占总孔隙体积的62.2%~84.9%,平均为71.86%;微孔占总孔隙体积的8.83%~23.60%,平均为15.14%;大孔和微孔体积接近,占6.27%~19.79%,平均为13.25%。

2 页岩吸附能力与吸附气量

页岩的等温吸附特征一般用langmuir等温吸附曲线来描述,在恒温下页岩的吸附气量是压力的函数^[11],即

$$V = V_L \frac{p}{p + p_L} \quad (1)$$

式中: V_L 为langmuir体积,m³/t,是理论上的饱和吸附量,表征最大吸附能力; p_L 为langmuir压力,MPa,是吸附量为langmuir体积一半时候对应的压力,表征吸附的难易程度; p 为平衡气体压力,MPa; V 为气体吸附体积,m³/t。

页岩样品的等温吸附测试采用美国麦克仪器公司

研制的 HPVA-200 型高压等温吸附仪,对 3 口井在纯甲烷平衡湿度的条件下进行了等温吸附测试,其中 LD1 井和 LC2 井试验温度为 30 ℃,YY1 井试验温度为 60 ℃。测得实验结果如下表(表 1),恒温 30 ℃时, V_L 为 1.64 ~ 3.06 cm^3/g ,平均为 2.46 cm^3/g , p_L 为 1.48 ~ 4.78 MPa,平均为 2.8 MPa;恒温 60 ℃时, V_L 为 1.90 ~ 3.39 cm^3/g ,平均为 2.88 cm^3/g , p_L 为 2.50 ~ 3.88 MPa,平均为 2.99 MPa。

从等温吸附曲线来看,整体上样品吸附量都随着压力增大而增大(图 1)。其中 LD1 井在 0 ~ 8 MPa 阶段,吸附量随压力增加并保持着稳定的线性增长,之后吸附量增长率只微幅变小,整体上曲线曲率较小,具有较高的 p_L ,平均为 3.45 MPa,表明其相对容易被吸附。

表 1 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩
岩样等温吸附 langmuir 参数

Table 1 Isothermal adsorption Langmuir parameters of
the Lower Silurian Longmaxi Formation shale
samples in western Hunan-Hubei area

样品号	试验温度/℃	$V_L/(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	p_L/MPa
LD1-3	30	2.65	2.35
LD1-10	30	1.96	4.07
LD1-17	30	1.64	4.78
LD1-24	30	2.70	3.71
LD1-31	30	2.14	3.27
LD1-38	30	2.79	2.44
LC2-3	30	3.06	1.48
LC2-7	30	2.76	1.55
LC2-18	30	2.46	1.57
YY1-37	60	1.90	2.50
YY1-48	60	3.39	2.59
YY1-51	60	3.35	3.88

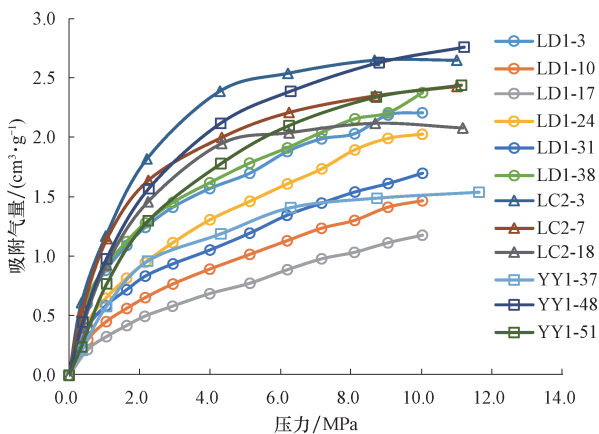


图 1 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩岩样等温吸附曲线

Fig. 1 Isothermal adsorption curves of the Lower Silurian
Longmaxi Formation shale samples in western Hunan-Hubei area

而 LC2 井和 YY1 井在 0 ~ 2 MPa 阶段,吸附量随压力呈线性增长,增长率较大,之后吸附量增长率逐渐变小,直至增长率近似于零,达到饱和吸附状态,整体上曲线曲率较大,平均 p_L 相对较低,为 2.3 MPa,表明其在低压区相对容易被吸附,而在高压范围吸附变得越来越难。

3 页岩吸附能力主控因素

影响页岩吸附能力的因素有很多,可将吸附能力的影响因素分为外部影响因素和内部影响因素,外部影响因素包括温度、压力、湿度等,内部影响因素可从有机质特征、矿物特征、孔隙特征等多个方面来研究。前人对页岩吸附能力影响因素进行过许多探索,并存在一些不一致的观点,Ramos^[12]和 Manger 等^[13]认为甲烷吸附量主要是 TOC 的贡献,而 Schettler 等^[14]和 Lu 等^[15]研究发现吸附量主要是与伊利石有关,Ross 等^[16]认为较高的粘土矿物含量具有较高的平衡湿度使得吸附能力较低,而 Aringhieri 等^[17]则认为粘土矿物有利于微孔发育并增加比表面积,有利于吸附作用。不同的沉积区域,吸附气量的影响因素各异,需要具体分析。笔者通过对不同影响因素的分析,探讨了有机碳含量、有机质成熟度、有机质类型、矿物成分、孔隙结构、温度和压力对湘鄂西地区龙马溪组页岩吸附能力的影响。实验结果表明该地区页岩的吸附能力受到上述因素的共同影响。

3.1 有机碳含量

北美地区许多页岩资料研究表明,页岩甲烷饱和吸附量和 TOC 之间呈良好的正相关关系^[18-20]。将湘鄂西地区龙马溪组页岩岩样的 TOC 和其在 30 ℃恒温下甲烷饱和吸附气量进行交会分析,同样也发现两者存在较强的正相关关系,相关系数达到 0.705 7(图 2)。有机碳具有明显的吸附特性,有机碳含量越高,页岩的吸附能力越强,有机碳含量是页岩吸附能力的重要影响之一。

3.2 有机质成熟度

有机质成熟度对吸附能力的影响前人取得了一定认识,聂海宽等^[21]对海相泥页岩吸附特征研究,均发现吸附气量随有机质成熟度增大具有先变大后变小的趋势。湘鄂西地区海相页岩有机质热演化程度很高,岩样测得的 R_o 都大于 2.0%,按照有机质热演化程度的分类标准,有机质热演化都属于过成熟,生干气阶段。由于 TOC 对吸附气量有很大影响,将饱和吸附气量除以 TOC,表征单位 TOC 的饱和吸附气量,并与 R_o

成交会图(图3),当 R_o 小于3.2%时,吸附气随着 R_o 增大而增大,在 R_o 为3.2%左右时达到最大,当 R_o 大于3.2%,吸附气变小。在有机质热演化过成熟阶段,刚开始成熟度变高会使纳米孔隙增多^[22-23],提供更多的表面积供吸附气赋存,使得吸附气量随着 R_o 的增大而增大,而到后期由于成熟度过高,有机质大量消耗,生气能力有限,使得吸附气量逐渐减少。

3.3 有机质类型

有机质类型不仅是生烃能力的重要影响因素,同时对气体的吸附能力也有影响。Zhang等^[24]通过对不同类型干酪根的吸附试验研究,表明不同类型的干酪根有机质吸附能力不同。笔者对不同有机质类型的岩样归类,计算出每个类型的单位TOC饱和吸附气量平均值,并成直方图,结果显示各类型干酪根吸附能力呈 II_2 型 $> II_1$ 型 $> I$ 型(图4)。通过分析干酪根显微组分发现, II 型干酪根的镜质组与惰质组的总和平均值占28.7%,大于 I 型干酪根的10%,而 II_2 型干酪根的镜质组与惰质组总和也大于 II_1 型。镜质组和惰质

组具有微孔特性和高内表面积,能为甲烷提供大量的吸附位置,其比重占得越大,有机质吸附能力越强^[25]。这也解释了图1中 I 型的LC2井岩样与 II 型的LD1井岩样等温吸附曲线形态不同, II 型曲线比 I 型曲线曲率小, P_L 大,更易吸附。因此,在缺少 III 型干酪根的海相页岩地区,各有机质类型页岩的吸附能力是 II_2 型 $> II_1$ 型 $> I$ 型。

3.4 矿物组成

X-衍射实验结果表明该地区龙马溪组页岩矿物的主要成分是石英和粘土矿物,两者总含量平均占全岩矿物的75%,除此之外含有少量的长石、方解石、白云石和黄铁矿等矿物。在矿物与页岩饱和吸附气的关系分析中,石英和粘土矿物与饱和吸附气没有显著的关系。而两类矿物之外的其他矿物中,黄铁矿与饱和吸附气之间有一定的正相关关系(图5),黄铁矿的形成与有机质演化过程中有机酸的形成有关^[26],一般与有机质共生,其含量越高有机质富集程度越高,进而与饱和吸附气呈正相关。此外黄铁矿颗粒内常发育晶间

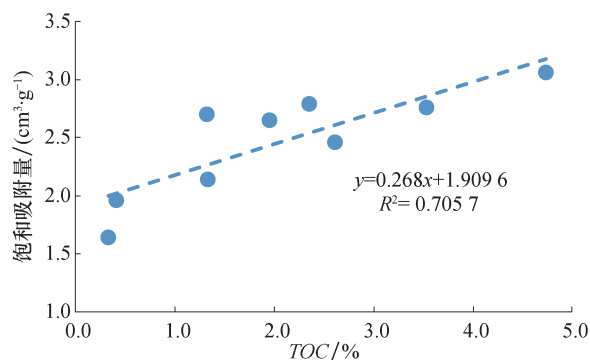


图2 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩岩样
TOC与饱和吸附量交会图

Fig. 2 Crossplot of TOC vs. saturated adsorption gas of the Lower Silurian Longmaxi Formation shale samples in western Hunan-Hubei area

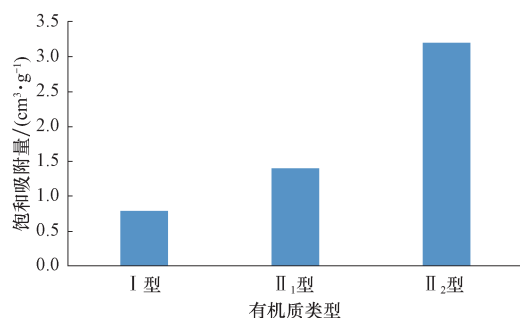


图4 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩岩样不同有机质
类型饱和吸附量直方图

Fig. 4 Histogram of saturated adsorption gas for different organic types of the Lower Silurian Formation shale samples in western Hunan-Hubei area

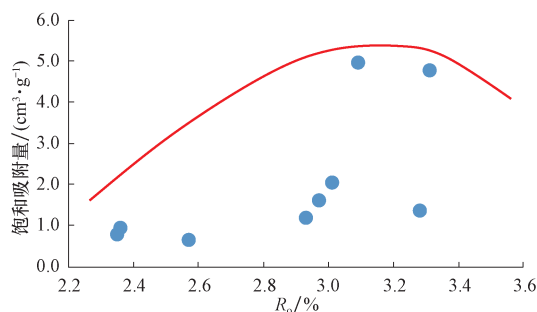


图3 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩岩样 R_o
与饱和吸附量交会图

Fig. 3 Crossplot of R_o vs. saturated adsorption gas of the Lower Silurian Longmaxi Formation shale samples in western Hunan-Hubei area

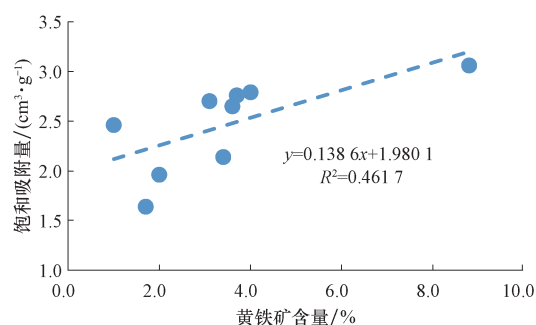


图5 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩岩样
黄铁矿含量与饱和吸附量交会图

Fig. 5 Crossplot of pyrite content vs. saturated adsorption gas of the Lower Silurian Longmaxi Formation shale samples in western Hunan-Hubei area

空隙,为吸附气提供了有效空间,因此,黄铁矿是页岩吸附能力的影响因素之一。

3.5 孔隙结构

孔隙空间是吸附气的客观赋存的必要条件,孔隙

表面为吸附气提供了吸附场所。利用低温氮吸附测试得到的 LD1 井岩样孔隙结构参数如表 2 所示,比表面积为 5.35 ~ 15.2 m²/g,平均为 10.38 m²/g,孔隙结构以中孔为主,其次为微孔和大孔。图 6 是孔隙结构特征参数与饱和吸附气之间的关系图,图中显示比表面

表 2 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩岩样孔隙结构参数

样品号	饱和吸附量/ (cm ³ · g ⁻¹)	BET 比表面积/ (m ² · g ⁻¹)	BJH 平均孔径/ nm	BJH 总孔容/ (cm ³ · g ⁻¹)	BJH 微孔容/ (cm ³ · g ⁻¹)	BJH 中孔容/ (cm ³ · g ⁻¹)	BJH 大孔容/ (cm ³ · g ⁻¹)
LD1-3	2.65	15.20	3.48	0.009 6	0.003 064	0.005 517	0.001 065
LD1-10	1.96	7.26	4.41	0.006 3	0.001 385	0.003 859	0.001 051
LD1-17	1.64	5.35	5.14	0.005 8	0.001 171	0.003 585	0.001 006
LD1-24	2.70	10.70	3.94	0.008 0	0.002 137	0.004 843	0.001 049
LD1-31	2.14	9.09	4.31	0.007 7	0.001 826	0.004 826	0.001 092
LD1-38	2.79	14.70	3.69	0.010 0	0.002 896	0.006 070	0.001 117

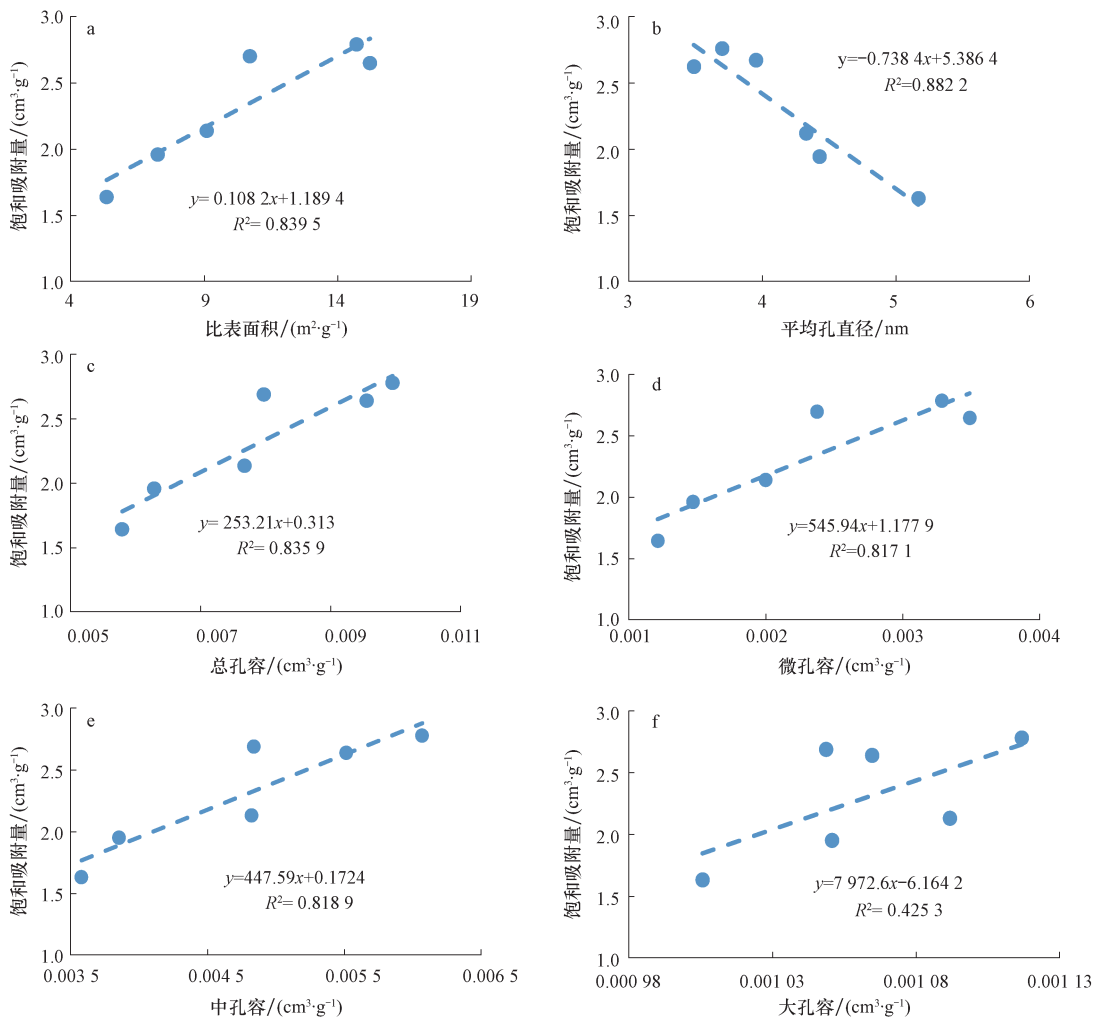


图 6 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩岩样孔隙结构特征与饱和吸附量交会图

Fig. 6 Crossplot of pore structure characteristics vs. saturated adsorption gas of the Lower Silurian Longmaxi Formation shale samples in western Hunan-Hubei area

a. 比表面积与饱和吸附量交会图; b. 平均孔径与饱和吸附量交会图; c. 总孔容与饱和吸附量交会图; d. 微孔容与饱和吸附量交会图; e. 中孔容与饱和吸附量交会图; f. 大孔容与饱和吸附量交会图

积和总孔容与饱和吸附气呈强正相关,而平均孔径则与饱和吸附气呈负相关。表明在以中孔为主的孔隙结构中,孔容积增多表面积增加为吸附气提供更多的赋存空间,而平均孔直径越小,所提供的总的孔容积和表面积就越多,更有利于吸附性。通过微孔、中孔和大孔体积与饱和吸附气的交会图,发现微孔和中孔与饱和吸附气的正相关性很强,都在 0.82 左右,而大孔和饱和吸附气的正相关性相对来说差了许多,说明作为小孔径的微孔与中孔提供了占多数的孔容积和表面积,对吸附气的贡献最大,是吸附气赋存的主要场所,大孔由于所占比例少,并且提供的吸附表面积也少,对吸附能力的支持有限。

3.6 温度和压力

在 30℃ 等温吸附试验和 60℃ 等温吸附试验的样品中各挑选出 TOC、 R_o 等参数相接近一个样品进行对比(图 7),结果发现在相同压力下,30℃ 的样品 LD1-24 比 60℃ 的样品 YY1-37 具有更强的吸附能力,这是因为页岩对气体的吸附作用主要为物理吸附,具有可逆性,温度升高使得气体分子热运动变得激烈,促使吸附气解析出来变成游离气,削弱了气体分子的吸附作用,所以温度与吸附能力呈负相关关系,是页岩吸附能力的重要影响因素之一。压力对吸附能力的影响显著,相同温度下吸附量随着压力的增大而增加,并且增加量会逐渐减小,最终等温吸附曲线变得平直,此时吸附达到饱和状态。湘鄂西地区早期持续深埋,晚期抬升,构造抬升会使得龙马溪组地层温度和压力降低,进而影响吸附能力^[27]。图 7 中地层在高压区(地层压力大于 2.5 MPa,对甲烷是高压区)内抬升,温度对吸附气的影响大于压力对吸附气的影响,页岩的吸附能力

会变高,吸附能力由 A 点 1.53 cm³/g 升高到 B 点 1.92 cm³/g,吸附量增加约 0.39 cm³/g,吸附气的增加量可从游离气或水溶气转换而来,如果没有充足的气源补给,会形成欠吸附状态。当地层抬升幅度很大,地层进入低压区时,压力对吸附气的影响大于温度对吸附气的影响,吸附气大量脱附转化成游离气,吸附气量迅速下降,如果抬升使保存条件变差,会使得游离气逸散,气藏遭到破坏。因此构造抬升的大小与吸附能力的变化具有一定的关系。

4 结论

1) 湘鄂西地区下志留统龙马溪组页岩的 langmuir 体积和压力均较大,恒温 30℃ 时,平均 langmuir 体积为 2.46 m³/t,平均 langmuir 压力为 2.8 MPa,表明该地区页岩的甲烷吸附能力较强,对页岩的储气能力提供良好的基础。

2) 有机碳含量、适中的成熟度、镜质组和惰质组含量、黄铁矿含量和微、中孔的体积是吸附能力的内部控制因素,对吸附能力具有促进作用。

3) 温度和压力作为外部控制因素,分别与吸附能力呈负相关和正相关性。构造抬升作用使得温度和压力降低,当地层在高压区内抬升时,温度对吸附气的影响大于压力对吸附气的影响,地层抬升使得页岩的吸附能力增强;当地层抬升幅度很大,地层进入低压区时,压力对吸附气的影响大于温度对吸附气的影响,会使得吸附气量迅速下降。

参 考 文 献

- [1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [2] 张金川,薛会,卞昌蓉,等. 中国非常规天然气勘探议[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 53-56.
Zhang Jinchuan, Xue Hui, Bian Changrong, et al. Remarks on unconventional gas exploration in China[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 53-56.
- [3] 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 Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [4] 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, 2008, 24(7): 15-18.
Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2008, 24(7): 15-18.
- [5] Mavor M. Barnett shale gas-in-place volume including sorbed and free gas volume[C] // AAPG Southwest Section Meeting. Texas: AAPG, 2003.
- [6] 李新景,胡素云,程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示

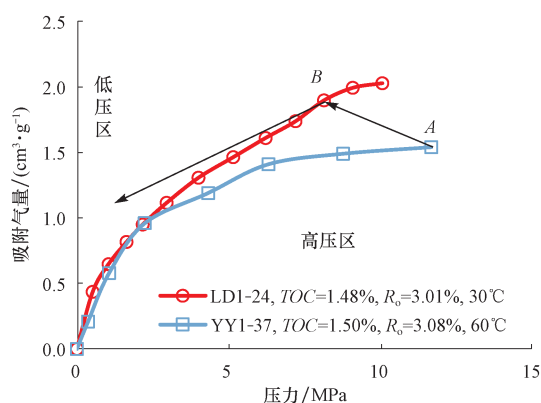


图 7 湘鄂西下志留统龙马溪组页岩
岩样不同温度等温吸附曲线

Fig. 7 Isothermal adsorption curves under different temperatures of the Lower Silurian Longmaxi Formation shale samples in western Hunan-Hubei area

- [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.
- [7] 胡晓凤. 湘鄂西地区油气藏类型及勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(3): 300–306.
- Hu Xiaofeng. Oil and gas reservoir types in the western region of Hunan and Hubei and exploration orientation[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(3): 300–302.
- [8] 李艳霞, 林娟华, 龙幼康, 等. 中扬子地区下古生界海相泥页岩含气勘探远景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 349–356.
- Li Yanxia, Ling Juanhua, Long Youkang, et al. Lower palaeozoic marine mud shale gas exploration prospects in the middle Yangtze areas[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 349–356.
- [9] 牟传龙, 周恩恩, 梁薇, 等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. 地质学报, 2011, 85(4): 526–532.
- Mu Chuanlong, Zhou Kenken, Liang Wei, et al. Early Paleozoic sedimentary environment of hydrocarbon source rocks in the middle-upper Yangtze region and petroleum and gas exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(4): 526–532.
- [10] 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等. 川东南—鄂西渝东地区下古生界页岩气勘探前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 364–371.
- Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. Shale gas exploration prospect of Lower Paleozoic in southeastern Sichuan and western Hubei-eastern Chongqing areas, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 364–371.
- [11] Ross D J K, Bustin R M. Impact of mass balance calculations on adsorption capacities in microporous shale gas reservoirs[J]. Fuel, 2007, 86(17): 2696–2706.
- [12] Ramos S. The effect of shale composition on the gas sorption potential of organic-rich mudrocks in the Western Canadian sedimentary basin[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2004: 159.
- [13] Manger K C, Curtis J B. Geologic influences on location and production of Antrim Shale gas[J]. Devonian Gas Shales Technology Review, 1991, 7(2): 5–16.
- [14] Schettler P D, Parnely C R. The measurement of gas desorption isotherms for Devonian shale[J]. Gas Shales Technology Review, 1990, 7(1): 4–9.
- [15] Lu X C, Li F C, Watson A T. Adsorption measurements in Devonian shales[J]. Fuel, 1995, 74(4): 599–603.
- [16] Ross D J K, Bustin R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia[J]. Canada Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2007, 55(1): 51–75.
- [17] Aringhieri R. Nanoporosity characteristics of some natural clay minerals and soils[J]. Clays and Clay Minerals, 2004, 52(6): 700–704.
- [18] Hicky J H, Henk B. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett shale, Mitchell 2 T. P. Sims well, Wise County, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 437–443.
- [19] Ross D J K, Bustin R M. Sediment geochemistry of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2006, 54(4): 337–365.
- [20] Hill D G, Lombardi T E, Martin J P. Fractured shale gas potential in New York[J]. Northeastern Geology and Environmental Sciences, 2004, 26(1/2): 57–78.
- [21] 聂海宽, 张金川. 页岩气聚集条件及含气量计算—以四川盆地及其周缘下古生界为例[J]. 地质学报, 2012, 86(2): 349–361.
- Nie Haikuan, Zhang Jinchuan. Shale gas accumulation conditions and gas content calculation: a case study of Sichuan basin and its periphery in the lower Paleozoic[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 349–361.
- [22] Tang X, Zhang J C, Jin Z J, et al. Experimental investigation of thermal maturation on shale reservoir properties from hydrous pyrolysis of Chang 7 shale, Ordos Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 64: 165–172.
- [23] 张琴, 刘畅, 梅啸寒, 等. 页岩气储层微观储集空间研究现状及展望[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 665–674.
- Zhang Qin, Liu Chang, Mei Xiaohan, et al. Status and prospect of research on microscopic shale gas reservoir space[J]. Oil and Gas Geology, 2015, 36(4): 655–674.
- [24] Zhang T W, Ellis G S, Ruppel S C, et al. Effect of organic-matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale-gas systems[J]. Organic Geochemistry, 2012, 47: 120–131.
- [25] Chalmers G R L, Bustin R M. The organic matter distribution and methane capacity of the Lower Cretaceous strata of Northeastern British Columbia, Canada[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70(1/3): 223–239.
- [26] 刘春莲, 董艺辛, 车平, 等. 三水盆地古近系(土布)心组黑色页岩中黄铁矿的形成及其控制因素[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 75–80.
- Liu Chunlian, Dong Yixin, Che Ping, et al. Pyrite formation and its controls in black shales of the buxin formation (lower Eocene) from the Sanshui basin, Guangdong[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 75–80.
- [27] 刘洪林, 王红岩. 中国南方海相页岩吸附特征及其影响因素[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 5–9.
- Liu Hongling, Wang Hongyan. Adsorptivity and influential factors of marine shales in South China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(9): 5–9.

(编辑 张亚雄)