

文章编号:0253-9993(2013)05-0760-06

川南富集区龙马溪组页岩气储层孔隙结构分类

陈尚斌^{1,2}, 夏筱红^{1,2}, 秦 勇^{1,2}, 付常青¹, 胡 琳¹

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤层气资源与成藏过程教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要:运用压汞法测定川南龙马溪组页岩气储层孔隙特征, 结合有机碳含量(TOC)、矿物成分进行多元回归分析, 探讨孔隙主要影响因素, 并对孔隙进行分类。结果表明, 孔隙度平均为4.71%, 发育程度中等; 储集空间由超大孔、大孔、中孔、小孔和微孔组成; 中孔、小孔和微孔为主要孔径, 6~120 nm的孔隙占有重要比例; TOC和脆性矿物对孔隙形成有积极意义, 且TOC影响最显著; 黏土矿物相反, 且其影响程度远小于TOC和脆性矿物含量。基于退汞曲线-TOC成因, 将龙马溪组孔隙结构划分为3种类型: I型(退汞曲线上凸型, 高TOC), II型(退汞曲线先凸后凹型, 低TOC)和III型(退汞曲线凹型, 中TOC), 其中具有I型孔隙结构的页岩气储层为最有利储层。

关键词:页岩气储层; 孔隙结构分类; 龙马溪组; 压汞实验

中图分类号: P618.13 文献标志码: A

Classification of pore structures in shale gas reservoir at the Longmaxi Formation in the south of Sichuan Basin

CHEN Shang-bin^{1,2}, XIA Xiao-hong^{1,2}, QIN Yong^{1,2}, FU Chang-qing¹, HU Lin¹

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of CBM Resources and Reservoir Strata Process, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Taking the Longmaxi Formation in the south of Sichuan Basin as an example, this paper discussed the main factors influencing the pore structures, and studied the characteristics and classification of pore structures using the multivariate regression analysis which was determined by mercury injection method, total organic content (TOC) and mineral composition. The findings are as follows: the mean porosity is 4.71%; the reservoir space is a composite of five types of pores including ultra-large hole, macropore, mesopore, pore and micropore. The pore size less than 1 000 nm is mainly mesopore, pore and micropore, especially in 6-120 nm regions for large composition. Multiple regression analysis shows that TOC and fragile mineral content are in favor of the pore formation, while the clay mineral is opposite. The influence of clay minerals is far less than that of TOC and fragile mineral content, and the TOC is the most significant factor for the shale pore. Based on the mercury withdrawal curve shape and the TOC, pore structure types are divided into three categories: Type I (the convex part in the mercury withdrawal curve and with high TOC), Type II (the concave part in the mercury withdrawal curve and with low TOC), and Type III (the concave part in the mercury withdrawal curve and with moderate TOC). Type I pore structure is in most favor of shale gas reservoir.

Key words: shale gas reservoir; pore structure categories; Longmaxi Formation; mercury injection method

岩石由多种矿物晶粒、孔(裂)隙和胶结物组成, 经历漫长地质演变及复杂构造运动, 存留不同期次不同尺度的裂隙、孔隙。就孔隙结构表征而言, 有显微

观察法, 射线探测法, 及气体吸附、流体贯入法^[1]。针对不同页岩气储层采用不同方法开展了一些孔隙结构研究^[2-15], 其中运用高分辨率仪器进行形貌方面

收稿日期: 2013-01-08 责任编辑: 常 琛

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214702); 江苏高校优势学科建设工程资助项目; 国家自然科学基金资助项目(41272155)

作者简介: 陈尚斌(1983—), 男, 甘肃通渭人, 讲师, 博士后。E-mail: shangbinchen@163.com

的定性成因分类较多^[2-10,12-15],但不便于在实际运用中寻找页岩气有利储层孔隙结构。因此,压汞法和探针气体吸附法仍是孔隙结构重要的表征方法^[1],对比这两种方法,氮气吸附法在泥页岩微孔和中孔(<50 nm)分析方面有优势;压汞法受泥页岩孔径分布不均一性影响相对较小,能弥补氮气吸附法在大孔分析方面的不足^[16]。笔者^[11]用液氮吸附法对川南龙马溪组页岩气储层纳米级孔隙研究认为其主孔位于2~40 nm,大部分在压汞测试范围内,且可定量分析,其进汞-退汞曲线亦能反映孔隙结构部分形貌特征,目前还是很好的一种选择。基于压汞测试,结合有机碳含量和矿物成分等基础储层评价参数,尝试建立一种相对简单,操作性强,具有定量意义的孔隙结构分类方法,这对页岩气资源评价和成藏机理研究有重要意义。

1 实验

1.1 样品

16个样品采自页岩气富集区川南长宁—兴文地区下志留统龙马溪组底部黑色泥页岩段(SX98~SX01为由浅到深的样品编号)。本区龙马溪组属浅海陆棚相沉积环境,厚度约为270 m,岩性以灰—黑色泥页岩为主,页理较发育,富含笔石,可分上、下两段:下段为黑色炭质泥页岩、钙质泥页岩及硅质泥页岩;上段为灰、灰绿、黄绿色泥岩夹薄—中厚粉砂岩或薄层泥灰岩,夹黄灰色泥灰岩透镜体或薄层。按国家标准取样、破碎和筛分,制成颗粒直径1 cm以下,取样10~15 g。有机碳含量及矿物成分测试结果见表1。

1.2 实验方法及仪器

压汞实验采用美国MICROMERITICS INSTRUMENT公司9310型压汞微孔测定仪,仪器工作压力0.003 5~206.843 MPa,分辨率为0.1 mm,粉末膨胀仪容积为5.166 9 cm,测定孔径下限为6 nm,计算机控点式测量,高压段选取压力点36个,每点稳定时间2 s,样品测试质量3 g左右。手选纯净页岩,统一破碎至2 mm左右。上机前将样品置于烘箱中,在70~80 ℃的条件下恒温干燥12 h,装入膨胀仪中抽真空至压力<6.67 Pa时进行测试。

2 结果

因测试中粒样堆积得到的超大孔(定义为 $\phi \geq 100\ 000$ nm的孔隙),并非样品本身孔—裂隙,因此去除超大孔隙的孔容。其余孔隙分类依次为:大孔, $1\ 000\ \text{nm} \leq \phi < 100\ 000\ \text{nm}$;中孔, $100\ \text{nm} \leq \phi$

$< 1\ 000\ \text{nm}$;小孔, $10\ \text{nm} \leq \phi < 100\ \text{nm}$;微孔, $6\ \text{nm} \leq \phi < 10\ \text{nm}$ ^[19]。因受仪器性能限制,最小测试到6 nm,其以下孔隙未能测出;测试结果见表2。

表1 样品基础分析数据

Table 1 Fundamental analysis of samples

| 样品编号 | 埋深/m | TOC含量/% | 黏土矿物含量/% | 脆性矿物含量/% |
|------|------|---------|----------|----------|
| SX98 | 40 | 0.54 | 57.4 | 31.2 |
| SH13 | 82 | 1.07 | 57.3 | 35.2 |
| SH08 | 94 | 1.18 | 63.5 | 27.6 |
| SH05 | 99 | 1.11 | 58.9 | 33.0 |
| SH03 | 108 | 1.28 | 65.9 | 27.3 |
| SX60 | 142 | 1.17 | 56.3 | 27.6 |
| SX58 | 145 | 1.21 | 54.2 | 28.0 |
| SX56 | 147 | 1.37 | 57.2 | 26.4 |
| SX48 | 158 | 2.33 | 56.4 | 31.4 |
| SX47 | 162 | 2.35 | 57.3 | 29.9 |
| SX44 | 165 | 2.46 | 53.5 | 35.8 |
| SX36 | 170 | 4.67 | 43.2 | 40.0 |
| SX22 | 177 | 4.15 | 22.7 | 66.8 |
| SX13 | 184 | 4.39 | 18.5 | 70.5 |
| SX07 | 188 | 3.82 | 16.8 | 73.7 |
| SX01 | 197 | 5.35 | 18.7 | 75.2 |

注:矿物成分数据引自文献[17],其中脆性矿物含量包括石英、方解石和白云石;TOC含量数据引自文献[18]。

3 讨论

3.1 孔隙度

孔隙度是确定游离气含量和评价页岩渗透性的重要参数。页岩气储层中微细孔隙形成大量表面积,提供潜在吸附位置,供气体赋存。实验显示孔隙度为1.71%~12.75%,平均4.71%,频度分布表明,孔隙度>4.0%的占41.2%。相对于美国五大含气页岩孔隙度(3%~14%),孔隙度中等。垂向上由浅至深^[18],孔隙度具有增大趋势,底部厚度约30 m的孔隙度均大于4%,有利于页岩气储存富集。

3.2 孔径分布

根据阶段进汞量特征,可以确定页岩气储层储集空间由超大孔、大孔、中孔、小孔和微孔5种类型组成(图1)。小于1 000 nm的中孔、小孔和微孔为主要孔径,特别是6~120 nm孔隙占有重要比例。

3.3 孔容与孔比表面积

样品总孔容为0.004 7~0.068 2 cm³/g,平均0.02 cm³/g,总孔比表面积为0.864 0~16.586 m²/g,平均为4.18 m²/g。垂向上,孔容和孔比表面积具有相似的趋势,数据显著地分布在两个区间,上段样品

表 2 孔容、孔比表面积及孔隙度数据

Table 2 Pore volume, pore surface area and porosity data

| 样品 编号 | 孔容/($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$) | | | | | 孔比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) | | | | | 孔隙度/% |
|----------|--|----------|----------|----------|---------|--|---------|---------|----------|----------|----------|
| | V_1 | V_2 | V_3 | V_4 | V_t | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_t | |
| SX98 | 0.001 43 | 0.006 27 | 0.009 25 | 0.001 48 | 0.018 4 | 0.001 0 | 0.168 8 | 1.261 9 | 0.749 3 | 2.181 0 | 4.280 6 |
| SH13 | 0.001 03 | 0.001 62 | 0.012 13 | 0.001 95 | 0.016 7 | 0.001 0 | 0.036 9 | 1.843 3 | 1.024 8 | 2.906 0 | 3.758 3 |
| SH08 | 0.000 93 | 0.000 71 | 0.004 55 | 0.001 95 | 0.008 1 | 0.001 0 | 0.013 2 | 0.886 7 | 0.997 1 | 1.898 0 | 2.023 0 |
| SH05 | 0.000 86 | 0.000 68 | 0.004 42 | 0.001 88 | 0.007 8 | 0.001 0 | 0.013 2 | 0.840 8 | 0.990 9 | 1.846 0 | 1.875 3 |
| SH03 | 0.001 66 | 0.001 31 | 0.007 48 | 0.003 21 | 0.013 7 | 0.001 0 | 0.027 7 | 1.306 6 | 1.577 7 | 2.913 0 | 3.413 4 |
| SX60 | 0.001 38 | 0.000 47 | 0.002 19 | 0.000 91 | 0.005 0 | 0.001 0 | 0.007 2 | 0.443 3 | 0.412 5 | 0.864 0 | 1.711 6 |
| SX58 | 0.001 36 | 0.001 31 | 0.006 81 | 0.002 28 | 0.011 8 | 0.001 0 | 0.026 4 | 1.315 8 | 1.180 8 | 2.524 0 | 2.800 7 |
| SX56 | 0.002 38 | 0.001 28 | 0.005 88 | 0.002 22 | 0.011 8 | 0.002 0 | 0.024 3 | 1.116 3 | 1.148 4 | 2.291 0 | 2.971 7 |
| SX48 | 0.001 56 | 0.000 60 | 0.002 96 | 0.001 24 | 0.006 4 | 0.001 0 | 0.010 2 | 0.603 1 | 0.637 6 | 1.252 0 | 1.758 0 |
| SX47 | 0.001 17 | 0.000 37 | 0.002 19 | 0.001 11 | 0.004 8 | 0.000 0 | 0.007 1 | 0.472 7 | 0.555 2 | 1.035 0 | 3.766 6 |
| SX44 | 0.001 31 | 0.000 37 | 0.002 06 | 0.000 94 | 0.004 7 | 0.001 0 | 0.006 1 | 0.438 4 | 0.515 5 | 0.961 0 | 2.789 2 |
| SX36 | 0.001 62 | 0.000 81 | 0.004 58 | 0.002 72 | 0.009 7 | 0.001 0 | 0.016 2 | 0.970 3 | 1.411 5 | 2.399 0 | 4.979 8 |
| SX22 | 0.001 18 | 0.005 12 | 0.026 67 | 0.012 99 | 0.046 0 | 0.001 0 | 0.100 6 | 5.358 0 | 6.834 5 | 12.294 0 | 8.722 8 |
| SX13 | 0.002 56 | 0.029 62 | 0.033 46 | 0.002 58 | 0.068 2 | 0.002 0 | 0.868 0 | 3.371 3 | 1.355 7 | 5.597 0 | 12.751 0 |
| SX07 | 0.003 12 | 0.005 30 | 0.009 71 | 0.013 45 | 0.031 6 | 0.003 3 | 0.110 7 | 1.955 0 | 7.242 9 | 9.312 0 | 7.090 6 |
| SX01 | 0.002 38 | 0.004 41 | 0.028 98 | 0.019 38 | 0.055 2 | 0.002 3 | 0.092 1 | 6.258 7 | 10.232 9 | 16.586 0 | 9.664 4 |

注: V_1, S_1 分别为大孔孔容和孔比表面积; V_2, S_2 分别为中孔孔容和孔比表面积; V_3, S_3 分别为小孔孔容和孔比表面积; V_4, S_4 分别为微孔孔容和孔比表面积; V_t, S_t 分别为总孔孔容和总孔比表面积。

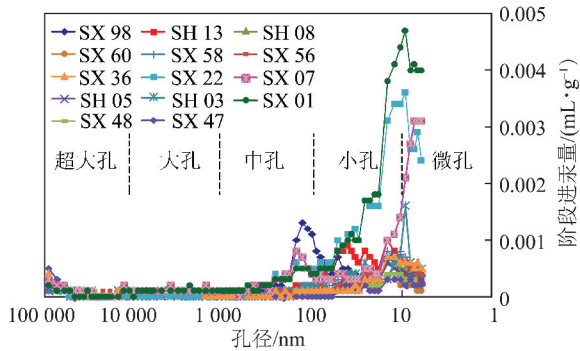


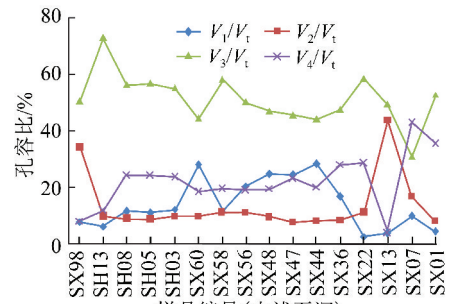
图 1 样品压汞阶段注入量与孔径关系

Fig. 1 Relationship between mercury incremental intrusion and pore diameter

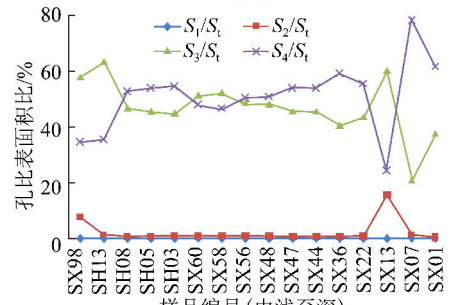
的总孔容和总孔比表面积均在平均值内,下段样品的总孔容和总比表面积随着深度增加而增大。中孔和小孔孔容的变化与总孔容的变化趋势相同;小孔和微孔的比表面积与总孔比表面积的变化趋势相同,孔容比图 2(a)表明小孔($10 \text{ nm} \leq \phi < 100 \text{ nm}$)是孔容的主要贡献者,孔比表面积比图 2(b)表明小孔和微孔($\phi \leq 100 \text{ nm}$)是总孔比表面积的主要贡献者。

3.4 进退汞曲线与孔隙结构

不同样品的压汞曲线(进汞-退汞曲线)孔隙滞后环宽度以及进汞、退汞体积差(压力差)不同,据此可分析样品的孔隙特征^[19]。将样品的孔隙大致分为 4 种类型(图 3)。



(a)



(b)

图 2 孔容比、孔比表面积比分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of pore volume ratio and pore specific surface area ratio

第 1 种类型(图 3(a)),进汞曲线在 5 MPa 左右迅速增大,压汞曲线孔隙滞后环宽大,退汞曲线上凸(或水平),进汞和退汞体积差极大,表明压汞测试孔径范围内开放孔孔多,孔隙联通性极好(退汞曲线

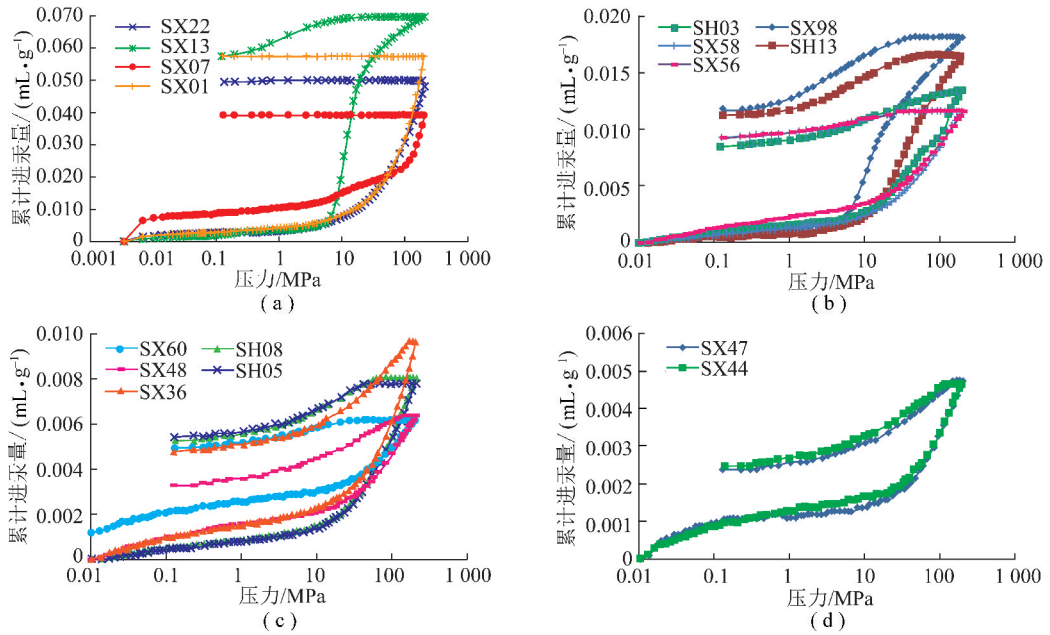


图3 不同样品进退汞曲线类型

Fig. 3 Mercury intrusion/ejection curve types of different samples

初始为上凸或水平,表明这阶段以行板状孔开放孔为主;且因有机质含量和脆性矿物含量高,小孔和中孔占绝对优势,这一阶段退汞量小,呈现水平或上凸形态)。这种孔径结构很有利于页岩气的解吸、扩散和渗透,其所代表的储层是页岩气勘探开发的有利储层,位于龙马溪组黑色页岩底部。

第2种类型(图3(b)),压汞曲线在5 MPa左右迅速增大,压汞曲线孔隙滞后环宽大,退汞曲线呈先上凸后下凹两个阶段,进退汞体积差很大,表明压汞测试孔径范围内开放孔很多,孔隙连通性很好。(因孔隙主体位于小孔,多为开放孔,这阶段退汞量较小,呈上凸形态)。该孔径结构也有利于页岩气的解吸、扩散和渗透,其所代表储层是页岩气勘探开发有利储层,位于龙马溪组下段中上部。

第3种类型(图3(c)),其压汞曲线孔隙滞后环较宽,进退汞体积差较大,表明压汞所测孔径范围内开放孔较多,孔隙连通性较好。该结构较有利于页岩气的解吸、扩散和渗透,其所代表储层是页岩气勘探开发有利储层。

第4种类型(图3(d)),其进汞曲线较之其他样品,存在一个显著增大区间,该区间压力小,进汞量迅速增大,即存在大比重的超大孔隙,孔容比分别为74.76%,64.48%,62.77%;其压汞曲线孔隙滞后环较窄,进退汞体积差较小,表明压汞测试孔径范围内开放孔较少,孔隙连通性一般。这种孔隙结构较不利于页岩气的解吸、扩散和渗透。

总体上龙马溪组底部开放孔极多,孔隙连通性很

好,是页岩气勘探开发有利储层。下段90 m内层间具有较明显孔隙结构差异,层间不均一性明显。

3.5 孔隙结构影响因素多元分析

影响孔隙结构的因素很多,但沉积环境和成岩作用演化决定的物质成分是本因素。笔者^[11,18]曾分析认为龙马溪组孔隙度与黏土矿物存在负线性关系,与脆性矿物、TOC均存在正线性关系。现将对孔隙度的3种主要影响因素,以及2种正相关因素采用SPSS软件分别进行多元回归分析,得到

$$Y = 0.175T + 0.127F - 0.021C \quad (R^2 = 0.9434)$$

$$Y = 0.419T + 0.095F \quad (R^2 = 0.9281)$$

式中, Y 为孔隙度,%; T 为TOC含量,%; C 为黏土矿物含量,%; F 为脆性矿物含量,%。

由3种因素拟合关系可知,TOC含量和脆性矿物含量均对孔隙的形成有积极意义,而黏土矿物相反,且黏土矿物的影响程度比TOC和脆性矿物含量的影响程度小一个数量级。黏土矿物层间孔大量存在,但却与孔隙度呈负相关,表明其层间孔主体不在压汞实验测试获得的孔隙范围内(6~10 000 nm);此孔隙范围内,主要是有机质生烃和排烃孔及脆性矿物形成的各类孔隙。由于有机质孔多为纳米级孔^[10],且多为半封闭孔;脆性矿物易形成溶蚀孔(墨水瓶型半封闭孔)和微裂隙(平行板状开放孔)。TOC含量微小增大会使孔隙度增加较大幅度,若脆性矿物含量增大,会使得构造作用形成的微裂隙容易延伸且页岩更容易破碎,则使半封闭孔及封闭孔成为开放孔。在成岩作用过程中,极细粒的黏土矿物可能会对TOC和脆

性矿物形成的孔隙进行填充,使泥页岩孔隙度减小。尽管黏土矿物在成岩过程中,矿物转化中也能形成大量的无机孔,但至少目前的结果表明,这类孔隙对页岩孔隙度所起的贡献作用不大,未来在勘探阶段也不易考虑高黏土区。

对有积极影响的 TOC 含量和脆性矿物含量进行多元回归分析发现,TOC 含量的影响程度是脆性矿物影响程度的 4 倍多,表明 TOC 含量是泥页岩中对孔隙影响最为关键和显著的因素。

3.6 退汞曲线-TOC 成因孔隙结构分类

以退汞曲线形态为主要因素,结合 TOC(孔隙主要影响因素),将孔隙划分为 3 种类型(图 4): I 型(退汞曲线上凸型,高 TOC), II 型(退汞曲线先凸后凹型,低 TOC)和 III 型(退汞曲线凹型,中 TOC)(这 3 类曲线样品的 TOC 平均值分别为 4.43%,1.09% 和 2.18%)。基于退汞曲线-TOC 成因的 3 种孔隙

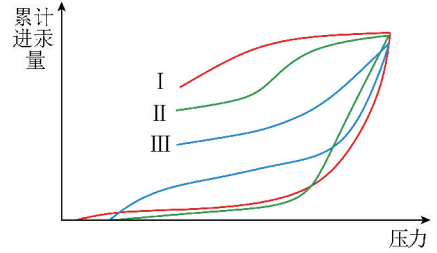


图 4 孔隙结构分类

Fig. 4 Classification of pore structure

结构类型特征列于表 3。其中具有 I 型孔隙结构的页岩气储层为最有利储层; III 型则在压裂改造基础上,储层孔隙系统有所改善,可成为较有利储层; II 型孔隙结构开放孔及连通性较好,但因低 TOC 含量(相应的吸附含量少)而不作为页岩气有利储层。因此具有 I 型孔隙结构特征可以作为寻找页岩气有利储层的主要依据之一。

表 3 退汞曲线-TOC 成因孔隙结构分类

Table 3 Genetic classification of pore structure using mercury withdrawal curve and TOC

| 类型 | 分类依据 | 特征 | 与页岩气储层的关系 |
|-------|-----------------------------|----------------------------------|---|
| I 型 | 退汞曲线呈上凸型,高 TOC (>4.0%) | 高孔隙度 (>4.0%); 开放孔多, 连通性好 | 页岩气最有利储层段; 有利于解吸、扩散和渗流 |
| II 型 | 退汞曲线呈先凸后凹型,低 TOC (<2.0%) | 中孔隙度 (3.0% ~ 4.0%); 开放孔较多, 连通性中等 | 页岩气较差储层段, 较有利于解吸、扩散和渗流, 但 TOC 低, 吸附含气量低 |
| III 型 | 退汞曲线呈凹型,中 TOC (2.0% ~ 4.0%) | 低孔隙度 (<3.0%); 开放孔少, 连通性差 | 页岩气较有利储层段, 不利于解吸、扩散和渗流, 但经压裂改造可改善 |

4 结 论

(1) 龙马溪组泥页岩孔隙度平均为 4.71%, 发育程度中等。储集空间由超大孔、大孔、中孔、小孔和微孔 5 种类型组成。中孔、小孔和微孔为主要孔径, 6 ~ 120 nm 的孔隙占有重要比例。总孔容平均为 0.02 cm³/g, 总孔比表面积平均为 4.18 m²/g。小孔是孔容的主要贡献者, 小孔和微孔是比表面积的主要贡献者。

(2) 多元回归分析表明, TOC 和脆性矿物含量均对孔隙的形成有积极意义, 黏土矿物则相反; 黏土矿物的影响程度远小于 TOC 和脆性矿物含量的影响。TOC 是泥页岩中对孔隙影响最显著因素。

(3) 基于退汞曲线-TOC 成因划分 3 种孔隙结构类型: I 型(退汞曲线上凸型, 高 TOC), II 型(退汞曲线先凸后凹型, 低 TOC)和 III 型(退汞曲线凹型, 中 TOC), 具 I 型孔隙结构的页岩气储层为最有利储层, 结果可作为寻找有利储层的依据。

建立一套集量化指标与形貌表征为一体, 便于操作, 经济实惠的页岩气储层孔隙结构分类体系在当前阶段尤为重要和迫切。本文借助压汞实验获得孔隙结构, 结合储层必需评价的 TOC 与矿物成分结果, 构建基于退汞曲线-TOC 成因的孔隙结构分类方案。尽管作为分类体系而言, 样本数量远远不足, 但可作为尝试为相关研究工作者提供参考。

参考文献:

- [1] 杨 侃, 陆现彩, 刘显东, 等. 基于探针气体吸附等温线的矿物材料表征技术: II. 多孔材料的孔隙结构[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(4): 362-368.
Yang Kan, Lu Xiancai, Liu Xiangdong, et al. Characterization technique II of mineral material based on probe gas adsorption isotherm: Nano-pore structure of porous material[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(4): 362-368.
- [2] Bustin R M, Bustin A M M, Cui X, et al. Impact of shale properties on pore structure and storage characteristics[J]. SPE119892, 2008: 1-28.
- [3] 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): 841-861.
- [4] Roger M S, Neal R O. 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.
- [5] Ambrose R J, Hartman R C, Diaz-Campos M, et al. Shale gas-in-place calculations part 1: New pore-scale considerations [J]. *SPE131772*, 2012: 219-229.
- [6] 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.
- [7] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(4): 665-667.
- [8] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [9] 聂海宽, 张金川. 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*, 2011, 33(3): 219-225, 232.
- Nie Haikuan, Zhang Jinchuan. Types and characteristics of shale gas reservoir; A case study of Lower Paleozoic in and around Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2011, 33(3): 219-225, 232.
- [10] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1857-1864.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value [J]. *Acta Petrological Sinica*, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [11] 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.
- [12] 焦淑静, 韩辉, 翁庆萍, 等. 页岩孔隙结构扫描电镜分析方法研究 [J]. *电子显微学报*, 2012, 31(5): 432-436.
- Jiao Shujing, Han Hui, Weng Qingping, et al. Scanning electron microscope analysis of porosity in shale [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2012, 31(5): 432-436.
- [13] 龙鹏宇, 张金川, 姜文利, 等. 渝页1井储层孔隙发育特征及其影响因素分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(10): 3954-3964.
- Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Jiang Wenli, et al. Analysis on pores forming features and its influence factors of reservoir well Yuye-1 [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(10): 3954-3964.
- [14] 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.
- [15] 吴勤, 马强分, 冯庆来. 鄂西建始中二叠世孤峰组孔隙特征及页岩气勘探意义 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2012, 37(S2): 175-183.
- Wu Kan, Ma Qiangfen, Feng Qinglai. Middle Permian pore characteristics and shale gas exploration significance from the Gufeng Formation in Jianshi, Western Hubei [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(S2): 175-183.
- [16] 谢晓永, 唐洪明, 王春华, 等. 氮气吸附法和压汞法在测试泥页岩孔径分布中的对比 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(12): 100-102.
- Xie Xiaoyong, Tang Hongming, Wang Chunhua, et al. Contrast of nitrogen adsorption method and mercury porosimetry method in analysis of shales pore size distribution [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(12): 100-102.
- [17] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 四川盆地南缘下志留统龙马溪组页岩气储层矿物成分特征及意义 [J]. *石油学报*, 2011, 32(5): 775-782.
- Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Characteristics and significance of mineral compositions of the Lower Silurian Longmaxi Formation shale-gas reservoir in the southern margin of the Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(5): 775-782.
- [18] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 页岩气储层特征: 一个典型的四川盆地南缘案例 [J]. *Energy*, 2011, 36(11): 6609-6616.
- Chen Shangbin, Zhu Yanming, Wang Hongyan, et al. Shale gas reservoir characterisation: A typical case in the southern Sichuan Basin of China [J]. *Energy*, 2011, 36(11): 6609-6616.
- [19] 陈尚斌, 朱炎铭, 李武, 等. 岩浆侵入对低阶煤田瓦斯突出影响 [J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2012, 22(2): 259-266.