

延长探区陆相页岩气产能影响因素分析

孙细宁^{1,4},陈奕奕^{2,3},王桂成¹,姜呈馥^{2,3},许小强^{3,4}

(1. 西安石油大学,陕西西安710065;2. 陕西省陆相页岩气成藏与开发重点实验室,陕西西安710075;
3. 陕西延长石油(集团)有限责任公司研究院,陕西西安710075;4. 陕西省页岩气勘探开发工程技术研究中心,陕西西安710075)

摘要:目前国内对页岩气产能的影响因素研究较为薄弱。为此,以鄂尔多斯盆地延长探区陆相页岩为研究对象,分别从宏观和微观两方面,深入地分析控制研究区陆相页岩产能的主要因素,认为有三个方面:(1)制约该区陆相页岩气产能的宏观影响因素有高吸附气含量、高黏土含量、强横向非均质性以及低地层压力,微观影响因素主要为有机质的连续性和黏土矿物与有机质之间的复杂空间分布关系;(2)基质渗透率是控制页岩气产能的重要因素,受有机碳(TOC)、有机质孔隙度、矿物成分和黏土矿物类型等多种地质化因素控制,但控制机理复杂;(3)有机质分散分布,与黏土矿物存在着复杂的共生关系,造成有机质孔隙连通性较差,制约着页岩气产能的提高。

关键词:陆相页岩;产能;基质渗透率;有机质;延长探区

中图分类号:TE132 文献标志码:A

Analysis of influencing factors on productivity of terrestrial shale gas in Yanchang exploration area

SUN Xining^{1,4}, CHEN Yiyi^{2,3}, WANG Guicheng¹, JIANG Chengfu^{2,3}, XU Xiaoqiang^{3,4}

(1. Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;2. Shaanxi Province Key Laboratory of Lacustrine Shale Gas Accumulation and Exploitation, Xi'an 710075, China;3. Research Institute of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Xi'an 710075, China;
4. Shaanxi Province Engineering Technology Research Center of Shale Gas Exploration and Exploitation, Xi'an 710075, China)

Abstract: The development of shale gas in China started late. At present, the research on the influencing factors of shale gas production is relatively weak. Therefore, the main factors controlling the production capacity of the terrestrial shale in Yanchang exploration area are analyzed in depth from both macro and micro aspects, research findings are as follows: (1) The macroscopic factors influencing the productivity of terrestrial shale gas in Yanchang exploration area include high adsorption gas content, high clay content, strong transverse heterogeneity and low formation pressure, and the microscopic factors mainly include the continuity of organic matter and the complex spatial distribution relationship between clay mineral and organic matter; (2) Matrix permeability is an important factor to control shale gas productivity, which is controlled by many geochemical factors such as TOC, organic matter porosity, mineral composition and clay mineral type, etc., but the control mechanism is complex; (3) The dispersion and distribution of organic matter and clay minerals have a complex symbiotic relationship, resulting in poor pore connectivity of organic matter, which restricts the improvement of shale gas production capacity.

Key words: terrestrial shale; productivity; matrix permeability; organic matter

页岩气是指存在于泥页岩及粉砂质泥页岩中的天然气聚集,具有“自生自储”、“源储一体”、“低孔低渗”等特点^[1-4]。近几年来我国页岩气发展迅速,四川盆地涪陵海相页岩气已经实现了商业开发^[5-6],为我国页岩气勘探开发提供了借鉴。目前鄂尔多斯盆地延长探区陆相页岩气勘探研究工作也

取得了一定的成果^[7-10],但产能建设较海相页岩气

收稿日期:2019-06-12;改回日期:2019-09-22。

第一作者简介:孙细宁(1990—),助理工程师,在读硕士研究生。主要从事非常规油气地质勘探方面的研究。E-mail:925728282@qq.com。

还有较大的差距,亟待找到影响陆相页岩气产能的控制因素。

页岩气藏具有特殊的赋存运移方式、复杂的裂缝系统、特殊的渗流模式^[11~15],页岩气井的产能受到多方面因素的控制^[16~19],延长探区陆相页岩与美国海相页岩及我国南方海相页岩存在较大的差异,需要结合陆相页岩的实际储层特征,全面系统地分析页岩气产能影响因素。为此,从宏观和微观两方面,深入地分析控制延长探区陆相页岩产能的主要因素,为陆相页岩后期产能建设打下良好的基础。

1 延长探区陆相页岩地质条件

1.1 研究区概况

鄂尔多斯盆地是发育在华北克拉通之上的叠合盆地,该盆地面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,北面接壤于河套盆地,南边跨越渭北挠褶带与渭河盆地相望,东接晋西挠褶带与吕梁隆起呼应,西经冲断构造带与六盘山、银川盆地对峙。

鄂尔多斯盆地中生代是在复杂的前中生代区域构造背景上,经历了印支和燕山两大构造旋回和复杂的多幕构造运动而发展起来的。印支运动奠定了中生代的构造格局,燕山运动继承和发展了它的构造特征。研究区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡东南部,区域构造为一平缓的西倾单斜,地层倾角小于 1° ,平均坡降 $7\sim8 \text{ m/km}$,内部构造简单,局部具有差异压实形成的低幅度鼻状隆起,横跨延安市的甘泉、宝塔、安塞、延长、延川、子长、宜川七县区和榆林市的横山、子洲两县(图1)。

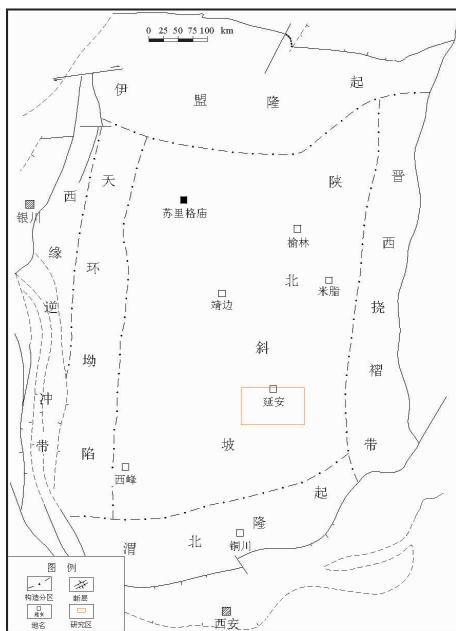


图1 研究区位置

1.2 研究区地层特征

延长探区陆相页岩目的层为中生界三叠系延长组长7段和长9段^[8~10,20]。中生代是鄂尔多斯盆地重要成油的地质时代。特别是晚三叠世,较快的地壳增生率、缺氧的还原环境和基底断裂的活化均为油气生成、运移与富集创造了极好的地球动力学背景。延长组是在中三叠世秦岭海槽最终关闭之后,盆地坳陷持续发展和稳定沉降过程中沉积的一套以河流-湖泊相为特征的陆源碎屑岩系,其沉积过程经历了湖盆发育初期的平原河流和三角洲环境-中期的湖泊环境-晚期的三角洲环境和泛滥平原-河流环境三个阶段。此次只对研究目标长7段和长9段进行地层特征概述。

长7段:厚 $100\sim120 \text{ m}$,岩性为暗色泥岩、碳酸泥岩、油页岩夹薄层粉、细砂岩,产介形虫、方鳞鱼化石及黄铁矿颗粒。可进一步划分为3个亚段,即长7³亚段、长7²亚段和长7¹亚段。长7段以湖泊体系为主,湖侵达到了鼎盛期,是最主要的生油岩系,长7段底部为一套灰黑色半深湖相油页岩,页理一般较发育,含有较多的动植物化石和黄铁矿散晶,是良好的区域性对比标志层,俗称“张家滩页岩”。

长9段:厚 $100\sim134 \text{ m}$,主要岩性为暗色泥岩、砂质泥岩夹灰色粉细砂岩、细砂岩不等厚互层。长9段顶部发育一套区域稳定分布的“李家畔”油页岩。

2 页岩气产能的宏观影响因素

延长探区陆相页岩储层特有的高黏土含量、强横向非均质性以及低地层压力的储层特征对页岩气的开发及产能有重要的影响,以下重点对黏土含量、横向非均质性以及地层压力进行具体研究。

2.1 有机碳(TOC)含量高,有利于建立产能

长7储层的TOC在 $3.0\%\sim7.0\%$,平均约4.7%,图2为延长长7陆相页岩储层与美国多个海相页岩储层的TOC对比图,通过对比发现,研究区的有机质含量丰富,有利于生气,研究表明其资源量在 $15.284 \times 10^8 \text{ m}^3$,资源量丰度 $1.55 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,资源丰度相对较大,为陆相页岩气产能的建设打下物质基础^[2,10,21]。

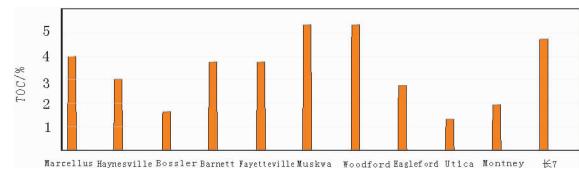


图2 延长探区延长组长7段TOC与美国主要盆地对比

2.2 吸附气含量高

根据 Langmuir 单分子层吸附理论,计算出表征泥页岩对甲烷等实验气体吸附特性的吸附常数 Langmuir 体积(V_L)、Langmuir 压力(P_L)以及等温吸附曲线(图 3)。

$$V = \frac{V_m b P}{1 + b P} = \frac{abP}{1 + bP} = \frac{V_L P}{P + P_L} \quad (1)$$

式(1)中: V 为吸附气含量, m^3/t ; V_m 为 Langmuir 吸附常数, m^3/t ; b 为 Langmuir 压力常数(与吸附剂、吸附质的特征及温度有关,为吸附速度常数与解吸速度常数的比值,反映页岩的内表面对气体的吸附能力), $1/\text{MPa}$; P 为气体压力, MPa ; V_L 为 Langmuir 体积,代表最大吸附能力,其物理意义是在给定的温度下,页岩吸附甲烷达到饱和时的吸附气含量, m^3/t ; P_L 为 Langmuir 压力,即 Langmuir 体积的一半所对应的压力, MPa 。

根据等温吸附实验获取的兰氏体积(V_L)和兰

氏压力(P_L),利用公式(1)可以计算地层温压条件下实际地层的吸附气含量。从延长探区 15 个样品的等温吸附实验数据和地层吸附气量计算结果来看(表 1),延长探区陆相页岩的吸附能力较强,兰氏体积较大,介于 $1.12 \sim 6.49 \text{ m}^3/\text{t}$ 之间,多数样品超过 $3 \text{ m}^3/\text{t}$,且试验结果的兰氏压力都比较低,说明研究区页岩具有较强的吸附能力。

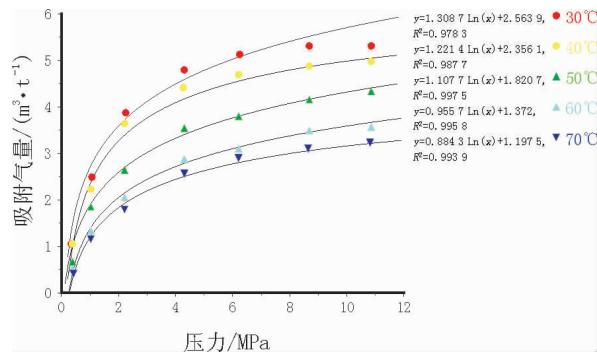


图 3 YY33-2 样品的等温吸附曲线

表 1 延长探区延长组不同样品的等温吸附实验结果

样品号	层段	深度/m	温度/°C	$V_L/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	P_L/MPa	地层吸附量/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)
YY33-2		1 609.40	30	6.14	1.43	
			40	5.74	1.49	
			50	5.23	2.12	3.63
			60	4.52	2.68	
			70	4.15	2.89	
			30	5.83	1.42	
YY34-1		1 392.19	40	5.23	1.48	
			50	3.99	1.71	3.10
			60	3.16	2.06	
			70	2.83	2.21	
YY34-6	长 7 段	1 400.71	40	6.49	1.83	
			50	4.99	1.95	3.91
YY13-1		1 194.98	48	2.61	5.37	1.55
			52	2.47	3.62	1.75
YY22-31		1 338.45	52	5.11	2.46	4.00
YY22-33		1 346.75	52	4.06	2.12	3.28
FY2(1)-3		1 409.00	54	2.59	3.70	1.85
FY2(1)-5		1 419.80	55	4.71	2.89	3.60
YY21		1 603.73	60	4.01	4.38	2.84
YY26		1 501.85	57	3.77	2.92	2.91
YY8		1 603.12	60	2.12	2.88	1.67
YY9	长 9 段	1 671.32	62	5.68	3.00	4.47
YY12			64	5.47	2.35	4.55
YY13-2		1 360.08	53	6.35	3.45	4.59

2.3 高黏土矿物含量分析

根据研究区 6 口井 142 块样品的全岩与黏土矿

物 X 衍射实验分析数据:碎屑矿物主要包括石英、黏土矿物、斜长石、钾长石、方解石、白云石和黄铁

矿,此外,也含有一定量的磷灰石、重晶石等矿物。其中,石英含量在8.0%~48.0%之间,平均含量为31.7%;斜长石含量在1.0%~19.0%之间,平均含量为9.1%;仅部分样品含钾长石,且含量一般不高,平均为4.4%;碳酸盐岩矿物中以方解石为主,含少量白云石,碳酸盐岩总量在1.0%~54.0%之间,平均含量为5.37%;黏土矿物含量分布在25%~65%之间,平均含量为48.85%。

2.3.1 脆性研究

国内外研究机构一般采用杨氏模量和泊松比来表征泥页岩储层的脆性,而石英含量与杨氏模量成正比,与泊松比成反比,所以石英含量越高,脆性越高^[22]。由矿物对比三角图(图4)可知,延长探区陆相页岩的石英、长石等脆性矿物含量明显要低于美国Barnett页岩和我国南方龙马溪组页岩,而黏土矿物含量明显高于这两者。对研究区100个样品进行岩石力学测定发现:长7段杨氏模量范围为1.84~6.20 GPa,均值为3.91 GPa,泊松比范围为0.12~0.56,均值为0.31。

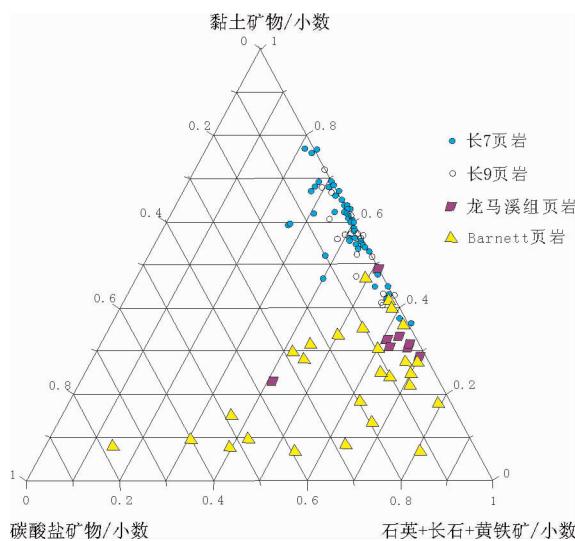


图4 延长探区陆相页岩与海相页岩矿物对比

脆性矿物含量越高越利于储层裂缝的发育和后期的压裂改造,岩石脆性对压裂成缝随着脆性的增加由单一裂缝向复杂的网络裂缝发展^[23],延长探区陆相页岩压裂成缝大致如图5位置所示。页岩压裂液类型的选取与脆性也有着直接的关系,通过调研国外的数据,对研究区长7储层压裂液的选取可提供指导(表2)。根据国外页岩气藏的开发数据:随着页岩的脆性降低,压裂液中流体的体积需降低,支撑剂的数量需增加。延长探区陆相页岩储层黏土含量高,岩石杨氏模量平均为3.91 GPa,滑溜水压裂的

效果可能会受限,采用复合水压裂液更好。

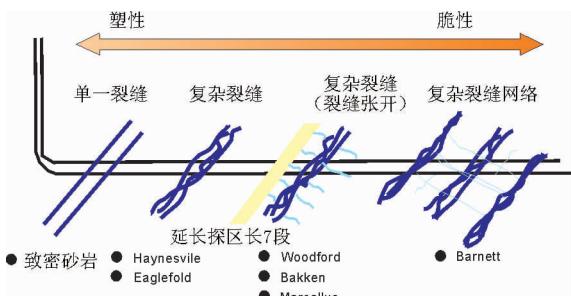


图5 岩石脆性对成缝能力的影响

表2 国外已开发页岩压裂液的类型与脆性的关系

杨氏模量/GPa	脆性指数/%	压裂液体系	支撑剂浓度	液体体积	支撑剂体积
7	70	滑溜水	低	高	低
6	60	滑溜水			
5	50	复合水			
4	40	复合水			
3	30	交联液			
2	20	交联液			
1	10	交联液	高	低	高

2.3.2 储层敏感性

高黏土矿物带来的另外一个影响产能的因素是储层敏感性,本次对黏土矿物的成分及其吸水膨胀性进行了研究和分析。由X衍射实验得出,黏土矿物以伊蒙混层为主,其含量在30%~88%之间,平均值为55.9%,其次是伊利石,平均含量为25.7%,再者是绿泥石,平均含量为15.17%,高岭石含量很少,平均值只有3.2%,而且大部分样品中不含高岭石。

由此可知,延长探区页岩储层中黏土矿物主要是伊蒙混层,易吸水膨胀,因此需对研究区储层岩石开展系统的液体敏感性分析,提高压裂液与地层的配伍性,降低压裂液伤害。

2.3.3 蠕变特性

高黏土矿物含量增强了页岩储层的蠕变特性,压裂改造后裂缝的存在将使储层蠕变速率大幅度提高,并对裂缝导流能力具有不可忽视的影响,裂缝蠕变将降低气井产能^[24]。页岩储层地应力计算、支撑剂类型与铺设方式优选中也应考虑蠕变的影响,而保持流体压力有利于维持裂缝导流能力,提高气井产能和采收率。

2.4 横向非均质性

长7储层渗透率平面非均质性评价结果表明,其渗透率变异系数为2.118,渗透率突进系数为

5.322, 渗透率级差为 71.086。YYP1 井的渗透率纵向非均质性评价结果表明: 其渗透率变异系数为 1.10, 渗透率突进系数为 3.17, 渗透率级差为 78, 研究区长 7 储层的非均质性强(表 3)。而认清储层的非均质性, 合理的划分压裂层段, 对于提高气井产能十分关键。

表 3 储层非均质性评价标准

非均质评价标准	变异系数	突进系数	级差	综合系数
弱	<0.5	<2	<20	<20
中	0.5~0.9	2~3	20~30	20~30
强	>0.9	>3	>30	>30

2.5 低地层压力

自早白垩世末期以后, 受燕山构造运动的影响, 研究区地层遭受抬升剥蚀, 地层剥蚀导致负荷降低, 孔隙体积发生反弹, 孔隙中流体因温度的下降而收缩, 使得孔隙体积增大, 造成延长探区陆相页岩低压的形成^[25]。研究区页岩地层的压力系数在 0.54~0.7 之间, 与我国南方涪陵海相页岩平均压力系数 1.55 相比要低很多^[26]。低地层压力所带来的问题是压裂液返排效率低、采收率低。因此, 需要提高地层压力, 采取增能压裂的措施。应该考虑采用 CO₂ 气体增能压裂, 以提高返排, 提高页岩气井产能。

3 页岩气产能的微观影响因素

基质中的微纳米孔隙是页岩气藏重要的储集和运移空间, 基质渗透率(流体在基质中以及从基质到微裂隙的运移能力)是控制页岩气产能的关键因素, 受控于有机质丰度和有机质孔隙度、热演化成熟度、黏土矿物和微观孔隙结构类型等多种地质、地化因素, 但影响因素复杂, 控制机理尚无定论。

3.1 页岩基质渗透率低, 却是控制页岩气产能的重要因素

页岩致密, 基质孔隙度和渗透率低。现有的岩心分析结果表明, 页岩基质孔隙极其不发育: 总孔隙度一般小于 10%, 含气有效孔隙度一般只有 1%~5%。Soeder 研究指出含微裂隙页岩的渗透率一般为 (0.001~0.1) × 10⁻³ μm², 基质渗透率为 (10⁻⁹~10⁻⁵) × 10⁻³ μm²^[27]。延长探区的储层基质物性差, 基质渗透率只有 (0.0001~0.001) × 10⁻³ μm²。

页岩由基质和裂隙组成, 具有双重渗流特性。页岩气生产过程中, 气体从基质运移到微裂隙, 再从微裂隙运移到天然裂隙和人工裂隙, 最终进入井筒^[17]。气体从基质运移到微裂隙的能力是制约页

岩气产能的关键因素。

理论和生产数据都表明, 尽管流体在基质中比在裂隙中流动慢, 很多情况下基质渗透率却控制着页岩气的产能。1991 年, GRI(美国气体研究学会)从井场和实验室收集了渗透率的数据, 发现当基质渗透率大于 10⁻⁶ × 10⁻³ μm² 时, 采收率由裂隙渗透率和基质渗透率共同决定。当基质渗透率小于 10⁻⁹ × 10⁻³ μm² 时, 采收率太低而没有商业开采价值^[28]。当基质渗透率在 10⁻⁹ × 10⁻³ μm² 到 10⁻⁶ × 10⁻³ μm² 之间时, 通过压裂改造可有效增大页岩储层的渗流特性, 基质渗透率成为控制页岩气产出的关键因素。延长探区的基质渗透率为 (0.0001~0.001) × 10⁻³ μm², 因此产能由基质渗透率和裂隙渗透率共同决定。

3.2 页岩基质渗透率由微纳米孔隙结构决定, 受多种地质地化因素控制, 但其微观影响机理不清

页岩中纳米级孔隙的发育决定含气页岩的渗流特性。微米级孔隙相连接的纳米孔隙网络共同组成了页岩气渗流通道, 控制着页岩气的运移机理。页岩的基质渗透率由微纳米孔隙结构决定, 受控于地质、地化等多方面因素。

页岩储层微观孔隙结构主要由有机质丰度和有机质孔隙度、干酪根类型、热演化成熟度、黏土矿物以及微观孔隙类型等因素控制, 并随着沉积环境、地区和深度的不同而不同。其中有机质丰度是纳米孔隙结构特征的主控因素。有机质是总孔体积与比表面积发育的物质基础。延长探区的 TOC 含量在 4%~6% 之间, 有机质微观孔隙相对发育。

黏土矿物对于纳米孔隙的发育也有影响。一方面, 黏土矿物和脆性矿物提供了其他类型的孔隙体积, 特别是脆性矿物对于尺度较大的微裂隙的贡献很大, 提供了游离页岩气主要的储存空间。另一方面, 黏土矿物表面积大小是影响有机质丰度的重要因素之一。有机质以可溶和微粒有机体两种方式存在于矿物颗粒表面, 矿物表面积大小的改变对有机质在沉积物中的分布具有直接的影响作用。

除了地化因素, 基质渗透率还受到地质方面因素的影响, 包括页岩的结构、孔隙度和岩性、生物扰动以及微裂隙。地质沉积影响页岩的成岩作用、有机质丰度(TOC)以及岩石结构, 从而影响基质渗透率。其他方面的因素还包括页岩类型、围压和孔隙压力等。对于这些影响因素的研究目前只局限于定性分析, 并没有建立他们与基质渗透率之间的定量关系。

3.3 有机质孔隙的相互连通程度是制约延长探区页岩气高产的原因

不同的孔隙类型对基质渗透率的贡献不同。有机质孔隙在增大基质渗透率方面具有重要作用。富含大量有机孔并且具备较好连通性的干酪根孔隙网络可以使气体突破渗流阈值在页岩储层中形成导流微通道,提高页岩储层的渗透率。有机质可能成为页岩气产层高产的潜在介质。有机质中的孔隙网络比裂隙中的孔隙网络大,当天然裂隙和水力压裂裂隙与有机质孔隙网络连通起来时,页岩储层的整体渗透率大幅度提高。延长探区的含气性较好,但目前产量不高,很可能是受到有机质孔隙相互连通性

的制约。研究区陆相页岩有机质分散,“点坝状”分布特征明显(图6),不易形成高速通道。

前期大量的陆相页岩扫描电镜实验可以看出:其有机质和黏土矿物之间的空间配置关系复杂,大多数有机质和黏土矿物混在一起,呈现不规则的分布关系(见图7a、图7b)。与美国 Barnett 页岩^[29](图7c)、我国牛蹄塘组页岩(图7d)为代表海相页岩的黏土矿物含量相对较低、有机质与黏土矿物的空间配置关系相对简单不同,这是我国陆相页岩同海相页岩的主要区别之一。由于有机质和黏土矿物复杂的共生关系,有机质通道可能更容易受到黏土伤害的影响。

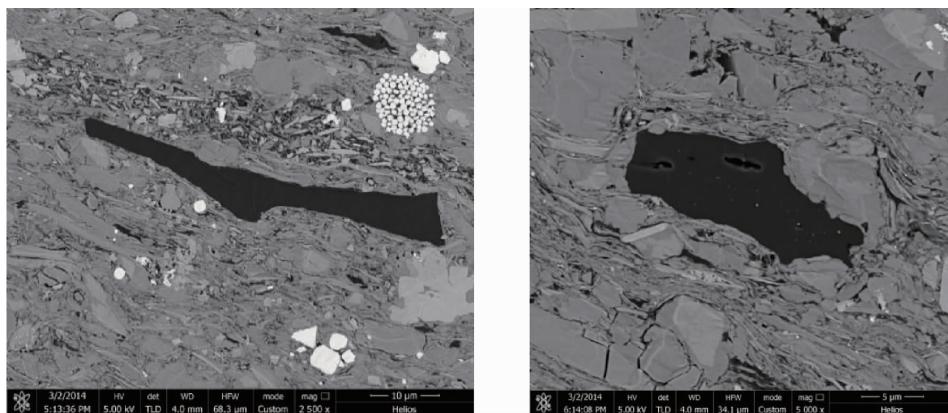


图6 延长探区YY33井延长组泥页岩样品扫描电镜图片

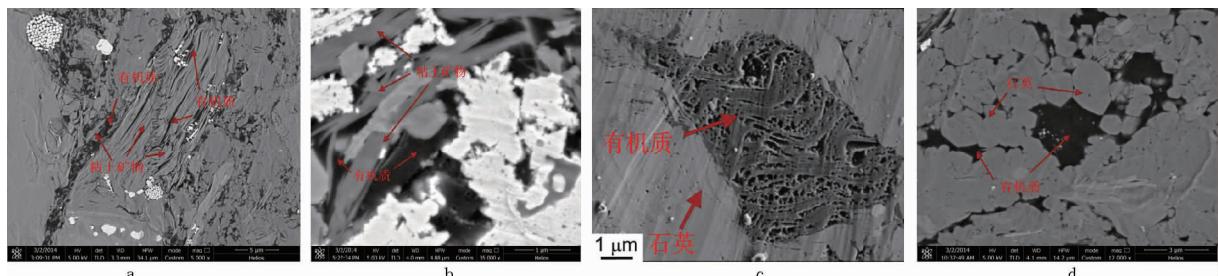


图7 延长探区陆相页岩(a,b)与 Barnett 海相页岩(c)、牛蹄塘组海相页岩(d)扫描电镜图对比

4 陆相页岩气产能主控因素讨论

目前,我国对于陆相页岩气的勘探开发还处于初步阶段,现有勘探井少有完整试气试采数据,难以建立各地质因素与产能的定量分析,只能对比国内外勘探开发成功的海相页岩进行定性分析,从与海相页岩的高产地质特征的对比来找出陆相页岩的主控因素,为以后陆相页岩气的产能建设提供理论指导。

不论是海相页岩还是陆相页岩,都具有“自生自储”、“低孔低渗”的特点,说明了它们之间具有相似的储集条件和渗流特征。所以研究陆相页岩气可

以从海相页岩入手,通过对比分析找出影响陆相页岩气产能的主控因素。国内外海相页岩高产井的地质特征:①高有机质含量,TOC一般大于2%;②脆性矿物含量高,石英、长石等脆性矿物含量一般高于50%;③高地层压力,地层压力系数一般在1.4~2.2,高产井一般大于2.0;④发育大量基质孔隙和裂缝。结合陆相页岩的宏观特征可以得到影响陆相页岩气产能的主控因素有:①高有机质含量有利于页岩气的生成,研究区有机质含量一般在3%~7%,平均4.7%;②黏土矿物含量接近50%,脆性矿物含量相对较低,不利于后期压裂改造;③低地层压力,延长探区陆相页岩地层压力系数普遍在0.5~

0.74, 不利于页岩气高产能的形成; ④基质孔隙和裂缝相对欠发育, 孔隙间的相互连通关系复杂, 亦是制约陆相页岩气产能的主控因素。

5 结论及建议

(1) 延长探区陆相页岩气产能的宏观影响因素有高黏土含量、强横向非均质性以及低地层压力和低游离气含量; 微观影响因素主要为有机质的连续性和黏土矿物与有机质之间的复杂空间分布关系。

(2) 基质渗透率是控制页岩气产能的重要因素, 它由微观孔隙结构决定, 受多种地质、地化因素控制, 但其微观影响机理不清。

(3) 有机质孔的相互连通程度是制约延长探区陆相页岩气产能的重要原因。研究区陆相页岩有机质分散, 呈“点坝状”分布特征, 不易形成高速通道; 有机质与黏土矿物的空间配置关系复杂, 大多数有机质和黏土矿物混在一起, 一定程度上也影响了有机质孔的连通。

(4) 提高延长探区陆相页岩气产能的关键在于增大改造体积和降低储层黏土水化膨胀伤害, 建议采用 CO₂ 气体压裂技术。

参考文献:

- [1] 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): 8–15.
- [2] CURTIS J B. Fractured shale – gas system [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921–1938.
- [3] 李玉喜, 乔德武, 姜文利, 等. 页岩气含气量和页岩气地质评价综述[J]. 地质通报, 2011, 30(2–3): 308–317.
- [4] 邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 641–653.
- [5] 天工. 我国首个百亿立方米页岩气产能基地揭牌[J]. 天然气工业, 2018, 38(6): 9.
- [6] 综合. 我国首个大型页岩气田提前进入商业开发[J]. 西部资源, 2014(2): 26.
- [7] 王香增, 张金川, 曹金舟, 等. 陆相页岩气资源评价初探: 以延长直罗–下寺湾区中生界长 7 段为例[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 192–197.
- [8] 王香增, 高胜利, 高潮. 鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 294–304.
- [9] 王凤琴, 王香增, 张丽霞, 等. 页岩气资源量计算: 以鄂尔多斯盆地中生界三叠系延长组长 7 为例[J]. 地学前缘, 2013, 20(1): 1–7.
- [10] 姜呈馥, 王香增, 张丽霞, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长 7 段陆相页岩气地质特征及勘探潜力评价[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1880–1888.
- [11] LUFFEL D L, HOPKINS C W, SCHETTLER – JR P D. Matrix permeability measurement of gas productive shales [J]. SPE 26633, 1993.
- [12] 段永刚, 李建秋. 页岩气无限导流压裂井压力动态分析[J]. 天然气工业, 2010, 30(3): 26–29.
- [13] 程远方, 董内响, 时贤, 等. 页岩气藏三孔双渗模型的渗流机理[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 44–47.
- [14] 李勇明, 姚峰盛, 赵金洲, 等. 页岩气藏纳米孔隙微观渗流动态研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(10): 2657–2661.
- [15] 魏明强, 段永刚, 方全堂, 等. 页岩气藏孔渗结构特征和渗流机理研究现状[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(4): 73–77.
- [16] 洪亚飞, 王建忠, 孙强. 焦石坝页岩气储层产能影响因素分析[J]. 非常规油气, 2016, 3(5): 73–78.
- [17] 周登洪, 孙雷, 严文德, 等. 页岩气产能影响因素及动态分析[J]. 油气藏评价与开发, 2012, 2(1): 64–69.
- [18] 徐小明, 周明, 熊巍, 等. 页岩气产能影响因素分析[J]. 石油化工应用, 2013, 32(9): 10–12+17.
- [19] 梁榜, 卢文涛, 曾勇, 等. 潘陵焦石坝页岩气初期产能主控因素研究[J]. 江汉石油职工大学学报, 2016, 29(5): 1–4.
- [20] 徐红卫, 李贤庆, 周宝刚, 等. 鄂尔多斯盆地延长探区陆相页岩气储层特征[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 46–53.
- [21] JARVIE D, HILL R J, RUBLE T E, et al. Unconventional shale – gas systems: The mississippianbarnett shale of north – central Texas as one model for thermogenic shale – gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 47–499.
- [22] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3300–3306.
- [23] 延新杰, 李连崇, 张潦源, 等. 岩石脆性对水力压裂裂缝影响的数值模拟实验[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(3): 116–121.
- [24] 苗文培, 姜汉桥, 葛洪魁, 等. 页岩气储层蠕变特性及其对页岩气开发的影响[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4): 97–100.
- [25] 姚泾利, 段毅, 徐丽, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区中生界古地层压力演化与油气运聚[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(5): 649–656.
- [26] 房大志, 曾辉, 王宁, 等. 从 Haynesville 页岩气开发数据研究高压页岩气高产因素[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(2): 58–62.
- [27] SOEDER D J. Porosity and permeability of eastern devonian gas shale[C]//Paper SPE 15213 presented at the Unconventional Gas Technology Symposium of the Society of Petroleum Engineers held in Louisville, May, 1986, KY, USA.
- [28] 于荣泽, 张晓伟, 卞亚南, 等. 页岩气藏流动机理与产能影响因素分析[J]. 天然气工业, 2012, 32(9): 10–15.
- [29] 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, 96(6): 1071–1098.

(编辑 杨芝文)