

松辽盆地梨树断陷苏家屯地区页岩气 储层特征及含气性评价

宋振响¹, 李忠博², 张玺², 周卓明¹, 杨昊¹

(1. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126;

2. 中国石化东北油气分公司 勘探开发研究院, 长春 130062)

摘要:页岩油气资源评价过程中除需对页岩作为烃源岩的特征进行评价外,更重要的是对其储层特征进行评价,尤其是可压裂性和含气性评价,直接涉及到资源的可动性。基于松辽盆地梨树断陷苏家屯地区苏 2 井营一段泥页岩系统取心和分析测试结果,开展了泥页岩生烃潜力评价、可压裂性及含气性评价。结果显示该区营一段泥页岩具备较好的页岩气生成条件。泥页岩脆性矿物含量高、杨氏模量高、泊松比低,压裂条件有利;孔隙度和渗透率普遍较低,但发育大量的天然裂缝和微裂缝,且压裂过程中容易产生形态较为单一的垂直裂缝,镜下还见到大量的微-纳米孔隙,主要以微孔和中孔为主,为页岩气提供了有利的运移通道和储集空间。该区多口探井在钻、测、录井的过程中均在营一段见到了良好的油气显示,并试获了高产气流,现场解吸显示泥页岩平均含气量达 $2.5 \text{ m}^3/\text{t}$,显示出良好的资源规模及勘探开发前景。

关键词:可压性;含气量;页岩气储层;苏家屯;梨树断陷;松辽盆地

中图分类号: TE132.2

文献标志码: A

Characteristics of shale gas reservoirs and evaluation of their gas potential in Sujiatun area, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

Song Zhenxiang¹, Li Zhongbo², Zhang Xi², Zhou Zhuoming¹, Yang Hao¹

(1. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China;

2. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Northeast Oil & Gas Branch Company, Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: In addition to the characteristics of source rocks, we should pay more attention to the evaluation of reservoir characteristics in shale oil and shale gas resource assessment, especially evaluation of fracturing and gas content which are directly involved in the mobility of resources. In this paper, we studied the hydrocarbon generation potential of mud shale as well as the fracturing properties and gas content on the basis of test results from the first member of Yingcheng Formation in well Su2 in the Sujiatun area of the Lishu Fault Depression. The results show that the mud shale from the first member of Yingcheng Formation have good shale gas generating conditions in this area. High content of brittle minerals, high Young's modulus and low Poisson's ratio make the mud shale easy to crack. The porosity and permeability of the mud shale are generally low, but there are a lot of natural fractures and micro-fractures; as well single vertical cracks are prone to form during the fracturing process. Beyond that, there are a lot of micro-nanometer pores under the electron microscope, mainly micropores and mesopores. All of these different scales of fractures and the availability of pores provide a favorable migration pathway and storage space for shale gas. During drilling, measurements and logging in the first member of Yingcheng Formation, many wells have shown a large amount of oil and gas; meanwhile, high-yield gas flows were obtained in wells Su2 and Li2. Field desorption tests showed that the averaged shale gas content in the first member of Yingcheng Formation in well Su2 is $2.5 \text{ m}^3/\text{t}$, representing a considerable resource and a good exploration and development prospect.

Key words: fracturability; gas content; shale reservoir; Sujiatun; Lishu Fault Depression; Songliao Basin

松辽盆地梨树断陷目前已发现了 12 个油气田和多个含油气构造(图 1),但之前的勘探均是围绕

常规油气展开。近 2 年来,随着我国页岩气勘探工作的不断深入,梨树断陷页岩气资源潜力也逐渐受

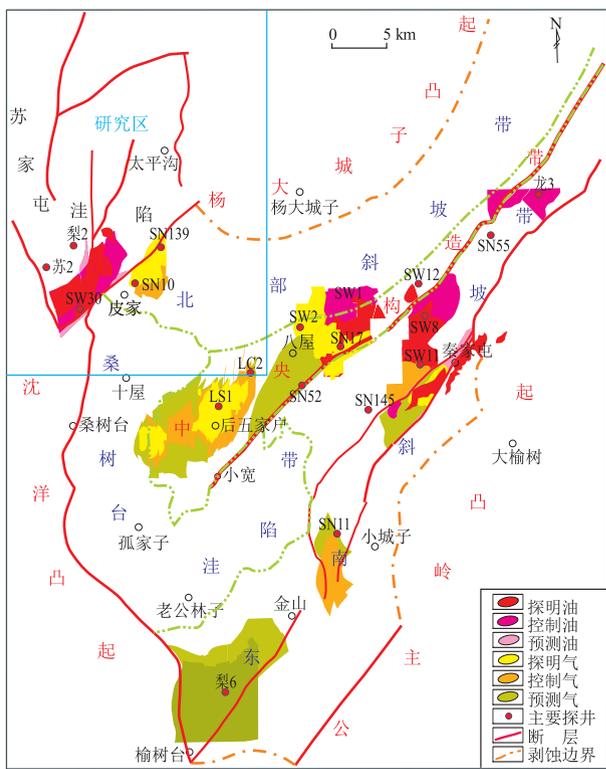


图1 松辽盆地梨树断陷构造单元划分

Fig.1 Tectonic zoning of Lishu Fault Depression, Songliao Basin

到重视。前人对梨树断陷烃源岩地球化学特征的研究已比较深入,并取得了一定的共识,认为沙河子组和营城组为其主力烃源层^[1-7],同时也是页岩气勘探的主要目的层。众所周知,页岩气与常规天然气藏最显著的区别在于它是一个“自生自储”系统^[8],泥页岩既是烃源岩,又是储层。评价结果表明梨树断陷营一段泥页岩作为烃源岩的生烃潜力勿容置疑,最关键的问题是储层评价。常规油气研究的重点是成藏,而非常规油气作为“自生自储”的油气系统,研究灵魂是储层^[9]。页岩气储层的特殊性决定了其评价思路和方法与常规储层研究有较大区别^[10]。本文主要以梨树断陷苏家屯地区苏2井营一段泥页岩系统分析测试资料为基础,重点从泥页岩储集特征和含气性方面来讨论页岩气的勘探开发前景,这对梨树断陷页岩油气有利区优选、下一步勘探开发等都具有一定的指导作用。

苏家屯洼陷位于梨树断陷西北部(图1,图2),整体上表现为“南断北剥、东西超覆”的特征。苏家屯洼陷断裂较发育,近南北向桑树台控盆断层为一级断层,延伸较远,为断陷期长期活动的断层,控制了登娄库组以下地层的沉积;北东向皮家走滑断层为二级断层,控制了早期地层的沉积,对梨树断陷构造格局的划分起着重要作用,将苏家屯洼陷与梨树断陷主体分割开。近南北走向的曲家

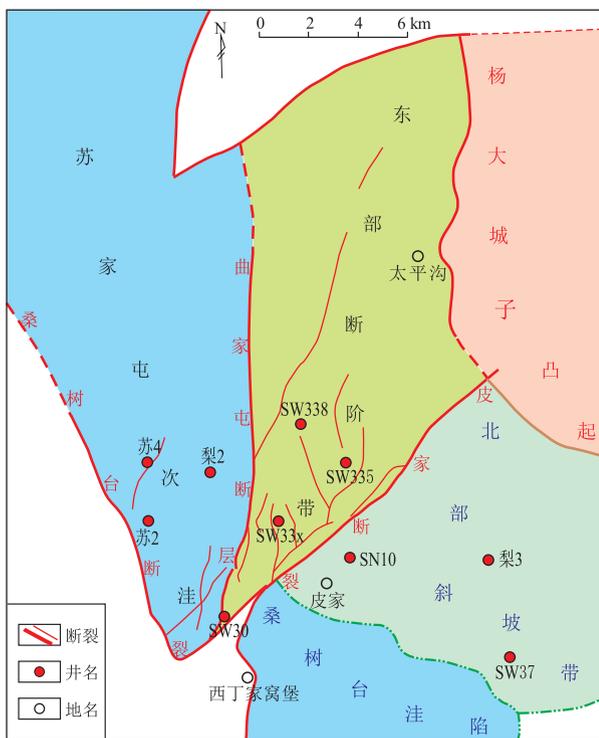


图2 松辽盆地梨树断陷苏家屯洼陷主要断裂分布与构造单元划分

Fig.2 Distribution of main fractures and tectonic zoning of Sujiatun Sag, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

屯断层将洼陷划分为苏家屯次洼和东部断阶带2个三级构造单元。其中位于西部的苏家屯次洼地层稳定,断裂不发育,有利于页岩气的形成和保存^[11]。

1 泥页岩生烃潜力

1.1 泥页岩分布特征

前人研究表明,梨树断陷主力烃源岩层为沙河子组和营城组,同时这2套地层也是页岩气发育的主要目的层段。参考含油气泥页岩段的划分标准^[12],梨树断陷纵向上可划分出营一Ⅱ段、营一Ⅰ段和沙二段3套含油气泥页岩(图3)。苏家屯地区也主要发育这3套含油气泥页岩,且平面分布稳定,尤以营一Ⅰ段含油气泥页岩连续性最好,可全区追踪对比,苏2、梨2井营一Ⅰ、Ⅱ段泥页岩累计厚度均超过100 m,其中单层连续厚度最大可达72 m。营一段沉积时期,苏家屯洼陷除在东北部以扇三角洲沉积为主外,其余地区均以深湖—半深湖相沉积为主,为连续暗色泥页岩发育的有利层段。

1.2 泥页岩生烃能力

苏2井营一段3 272~3 344 m发育一套连续的黑色泥页岩段。为了查明梨树断陷页岩气资源潜力,对苏2井营一段3 282~3 332 m黑色泥页岩进行了连续取心,并开展了系统全面的分析测试工

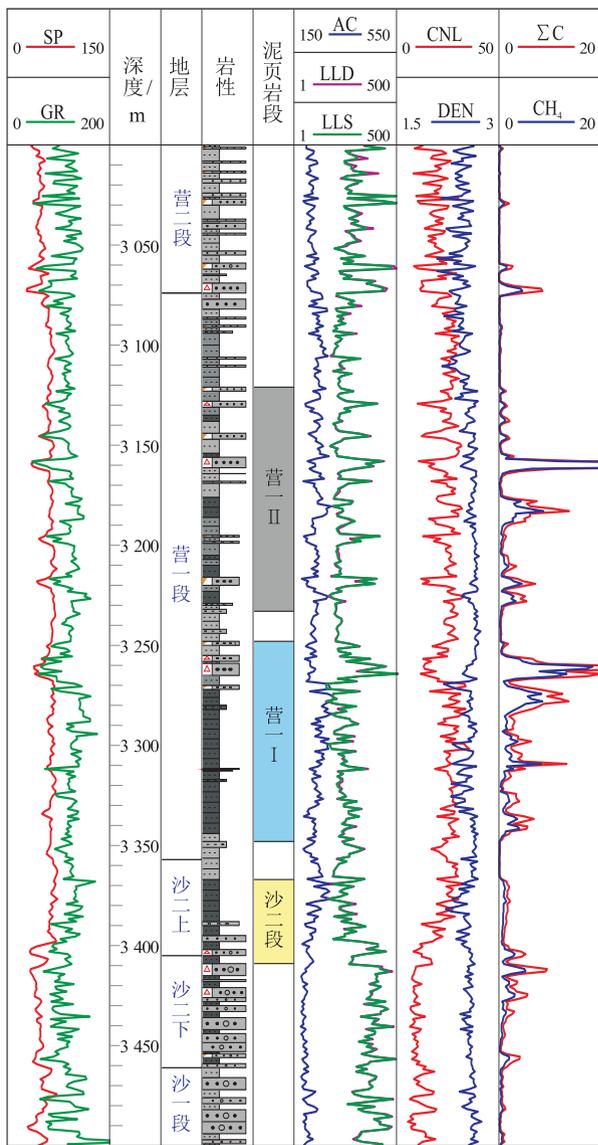


图 3 松辽盆地梨树断陷苏家屯洼陷苏 2 井含油气泥页岩划分对比

Fig.3 Classification and correlation of mud shale in well Su2, Sujiatun Sag, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

作。测试结果表明,营一段泥页岩有机质丰度总体较高,TOC 含量多分布在 0.5%~4.0%之间,平均值达 1.88%,其中,TOC 含量大于 2.0%的样品将近 40%,生烃潜力较大^[11];泥页岩实测 R_o 分布在 1.83%~2.19%之间,平均值为 2.05%,进入大量生气阶段;有机质类型主要以 II₁、II₂型为主,其他井主要以 II₂和 III型有机质为主,生气条件有利。从苏 2 井营一段泥页岩生烃潜力特征可以看出,苏家屯洼陷营一段泥页岩具备形成页岩气的有利条件。采用目前国内通用的体积法初步估算,苏家屯洼陷营一段页岩气地质资源量达到 $180.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2 泥页岩储层特征及其可压裂性

页岩气主要赋存在极低孔隙度和渗透率的泥

页岩系统中,赋存状态主要为吸附和游离态,少量溶解态^[13]。由于其生成机理和所处环境的特点,页岩储层一般需经过大型压裂形成裂缝网络才能形成工业产能^[14]。单纯的优质泥页岩不一定能形成经济型页岩气藏,还受其赋存状态、裂缝及孔隙发育程度的控制;另外由于泥页岩孔渗极低,在考虑有利目标选择时,除考虑资源潜力外,还必须考虑泥页岩的可压裂性^[15-16]。可压裂性是泥页岩地质、储层特征的综合反映,其主要影响因素包括泥页岩储层孔渗结构、矿物组成、岩石力学性质及储层非均质性^[17]。

2.1 泥页岩矿物组成

页岩具有很强的非均质性,主要由黏土矿物、碎屑、非碎屑矿物以及有机质组成。研究表明岩石脆性与矿物组成密切相关,脆性矿物主要包括自生石英和方解石,长石和白云石也可以对泥页岩的脆性做出贡献^[18]。脆性矿物含量的高低不仅影响裂缝发育,也直接影响泥页岩后期压裂改造的效果,国外获得页岩气突破地区的页岩一般表现为石英、碳酸盐岩等脆性矿物含量高,且黏土含量低于 30%。

苏 2 井营一段泥页岩矿物含量分析(图 4)显示,石英含量分布在 25%~46.8%之间;方解石、白云石、硬石膏等碳酸盐矿物含量主体分布在 8%~30%之间,2 个样品超过 60%,为泥质灰岩;从黏土矿物含量来看,除 2 个泥质灰岩黏土矿物含量较低(4%)外,其余样品的黏土矿物含量分布在 28.5%~51.7%之间;斜长石含量分布在 2%~16.4%之间;此外,由于研究层段主要形成于深水还原环境,故泥页岩中普遍含有少量的黄铁矿、菱铁矿等矿物,含量在 5%以下。从苏家屯地区营一段泥页岩矿物含量来看,尽管石英含量较美国典型产气页岩中石英含量偏低,但总脆性矿物含量均超过 45%,

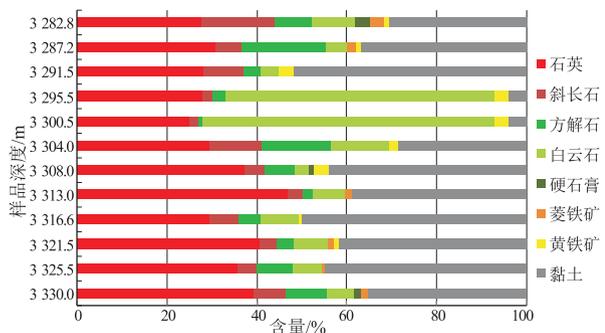


图 4 松辽盆地梨树断陷苏家屯洼陷苏 2 井营一段泥页岩全岩 X-衍射矿物含量

Fig.4 Distribution of mineral contents in mud shale from first member of the Yingcheng Formation, well Su2, Sujiatun Sag, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

主体分布在 48.3%~71.5% 之间,2 个泥质灰岩脆性矿物含量最高达 96%, 总体来看, 岩石具有较好的可压性。

统计发现苏 2 井营一段泥页岩 TOC 含量与矿物组成似乎具有一定的相关性, 表现为随黏土矿物和石英含量增加, TOC 含量有逐渐减低的趋势, 而与碳酸盐矿物含量之间呈现出一定的正相关性(图 5), 这与前人研究认为的海相页岩中 TOC 含量与石英含量呈正相关性^[19] 的结论存在差别, 表明海陆相泥页岩性质存在较大差别。

从泥页岩黏土矿物含量相对组成来看, 苏 2 井营一段泥页岩黏土矿物主要由伊利石、伊/蒙混层和绿泥石组成。伊利石相对含量在 45%~75% 之间, 平均值达 62.1%; 其次为伊/蒙混层, 相对含量介于 8%~30% 之间, 平均值为 18.7%; 绿泥石相对含量介于 3%~45% 之间, 平均值为 19.25%。由于该区泥页岩埋深较大(超过 3 000 m), 已达到高—过熟演化阶段, 泥页岩的成岩作用主要表现为化学压实作用, 黏土矿物中的蒙脱石向伊/蒙混层和伊

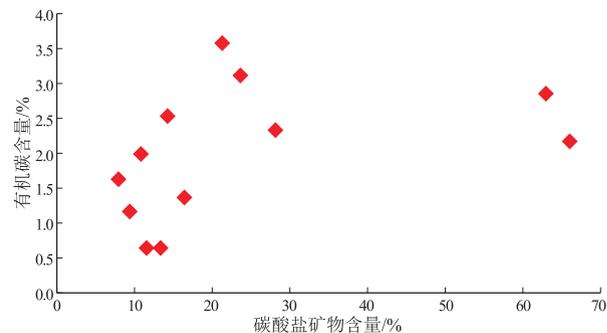


图 5 松辽盆地梨树断陷苏家屯洼陷苏 2 井营一段碳酸盐矿物含量与有机碳含量关系

Fig.5 Relationship between carbonate mineral content and TOC in mud shale from first member of Yingcheng Formation, well Su2, Sujiatun Sag, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

利石转变, 高岭石向伊利石转变^[20]。黏土矿物转变过程中除形成新的矿物外, 还将释放出硅等离子, 这也将提高岩石的脆性程度^[21]。

2.2 泥页岩裂缝及储集物性特征

在常规油气研究过程中, 裂缝作为油气的重要储集空间和运移通道, 一直是一项重要研究内容^[22]; 非常规油气中更是如此, 裂缝发育程度直接影响到油气产量的高低^[23]。泥页岩中的微裂缝能极大改善泥页岩的渗流能力, 为油气运移提供通道, 同时泥页岩中发育的微纳米孔和微裂缝也为页岩油气提供了储集空间^[13,24]。前人研究认为泥页岩中主要存在构造缝(张性缝和剪性缝)、层间页理缝、层面滑移缝、成岩收缩微裂缝和有机质演化异常压力缝等 5 种裂缝, 并提出了这 5 种裂缝的识别特征及其控制因素^[23]。从苏 2 井岩心照片(图 6a)可以看出, 营一段泥页岩水平层理缝、层间缝、斜交缝、高角度裂缝和微裂缝十分发育, 且不同缝之间相互穿插, 提供了良好的油气运移通道。此外, 铸体薄片(图 6b)中也常可见到泥页岩内部由铸体充填的裂隙, 裂隙宽度一般在 0.01~0.15 mm 之间。

泥页岩属于低孔低渗的沉积岩, 储层物性差, 孔隙度多小于 6%, 渗透率多小于 0.5 mD^[9], 随裂缝发育程度的不同而有较大的变化^[23]。苏家屯地区苏 2 井营一段系统取心的泥页岩孔隙度分布在 0.89%~5.80% 之间, 平均值为 3.52%; 3 个样品测得了渗透率数据, 其中一个样品的渗透率达到 1.54 mD, 推测可能和该样品处在裂缝发育带有关, 其他 2 个样品的渗透率极低, 分别为 0.014 1 mD 和 0.001 16 mD。比较而言, 苏家屯地区营一段泥页岩孔渗稍低于美国主要产气页岩储层岩心分析孔隙度(平均值为 4.22%~6.51%) 和渗透率(多小于 0.1 mD)^[10]。

泥页岩非均质性极强, 在扫描电镜下可以观察

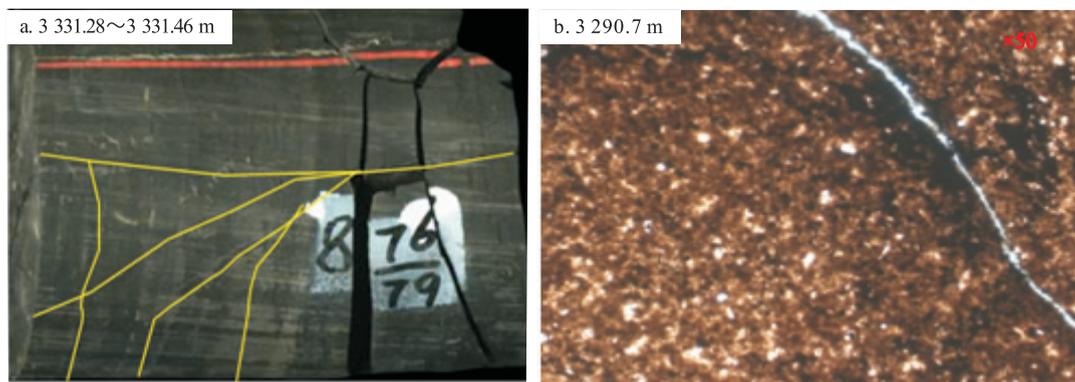


图 6 松辽盆地梨树断陷苏家屯洼陷苏 2 井营一段泥页岩岩心照片(a)和铸体薄片显示裂缝发育情况(b)

Fig.6 Fracture development in a mud shale core sample (a) and a cast thin section (b) from the first member of the Yingcheng Formation, well Su2, Sujiatun Sag, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

到不同级别的孔隙、喉道、晶洞和微裂缝系统,有学者将泥页岩孔隙类型划分为粒间孔、粒内孔、有机质孔和晶间孔等^[25]。从苏2井营一段泥页岩的扫描电镜分析结果^[11]来看,泥页岩微裂缝及微孔极发育,具备较好的油气储集空间。

泥页岩主要发育微—纳米孔隙,根据国际理论和应用化学协会(IUPAC)对孔隙的分类,将孔隙类型分为微孔(小于2 nm)、中孔(2~50 nm)和宏孔(大于50 nm)^[26]。参照上述分类方案,苏2井营一段泥页岩主要发育微孔和中孔,除2个泥质灰岩(碳酸盐含量大于60%)发育中孔为主(大于65%)外,其余样品均以发育微孔为主(大于50%) (图7),仅有3个样品发育极少量宏孔。前人研究认为,赋存于宏孔隙和微裂缝中的页岩气主要以游离态存在^[27];而赋存于中—微孔隙中的页岩气主要以吸附态存在,这主要是由于黏土矿物多具有较大的比表面积,对气体有较强的吸附能力^[28]。苏2井营一段泥页岩微孔隙结构分析结果显示,除2个泥质灰岩样品外,其余样品孔隙的比表面积均超过15 m²/g,最高可达29.72 m²/g,为页岩气提供了有

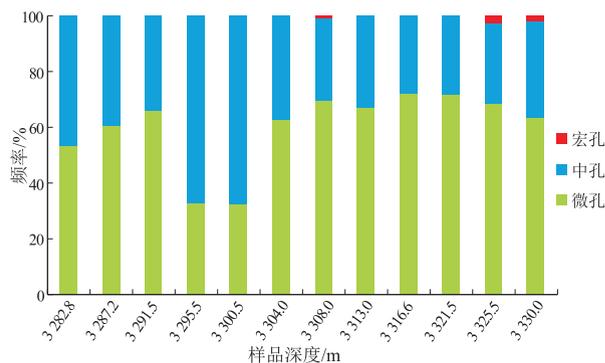


图7 松辽盆地梨树断陷苏家屯洼陷苏2井营一段泥页岩不同级别微孔隙频率分布

Fig.7 Distribution of micropores in mud shale from the first member of the Yingcheng Formation, well Su2, Sujiatun Sag, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

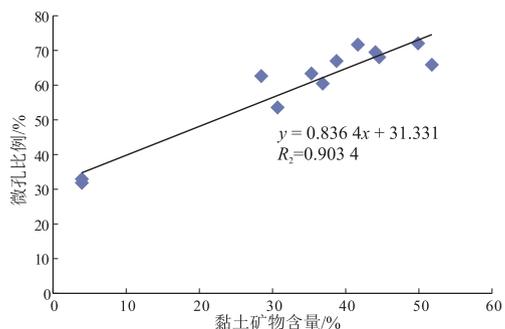
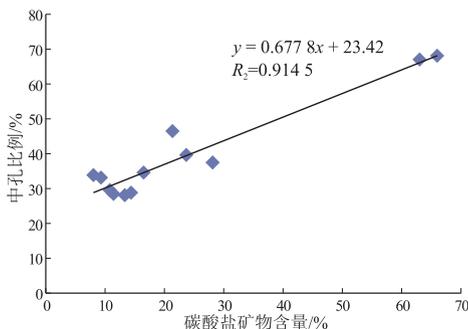


图8 松辽盆地梨树断陷苏家屯洼陷苏2井营一段泥页岩孔隙大小与矿物含量关系

Fig.8 Relationship between pore sizes and mineral content in mud shale from the first member of the Yingcheng Formation, well Su2, Sujiatun Sag, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

利的吸附空间。

与前述泥页岩矿物成分分析结果比较可以看出,泥页岩孔隙大小与矿物成分之间存在一定的相关性(图8)。总体表现为碳酸盐矿物含量与中孔比例之间具有良好的正相关性,黏土矿物含量与微孔比例之间具有良好的正相关性,而石英含量与孔隙大小之间不具有明显的相关性。这与前人认为的“黏土矿物含量与中孔体积呈正相关,碎屑矿物含量与宏孔体积呈正相关^[10]”的结论存在一定差异,表明泥页岩孔隙大小受控因素是比较复杂的。

2.3 岩石力学性质

泥页岩可压裂性一般通过杨氏模量和泊松比来表征。一般来说,页岩杨氏模量越高,泊松比越低,岩石脆性越强,越有利于压裂。美国页岩气的勘探实践表明,页岩杨氏模量大于20 GPa,泊松比小于0.25时有利于压裂^[29]。选择苏2井营一段2个泥页岩样品,采取平行、垂直层理面2种取样方式,样品1(3 157.81~3 158.04 m)垂直取样3个、水平取样3个,样品2(3 311.41~3 311.81 m)垂直取样1个、水平取样3个,对上述样品分别进行单轴抗压力学对比实验。实验结果表明在无围压和孔压条件下,样品1在垂直取样的条件下平均杨氏模量为39 GPa,抗压强度为146.96 MPa,泊松比为0.199;水平取样条件下平均杨氏模量为43.5 GPa,抗压强度为170.04 MPa,泊松比为0.197(表1)。参照页岩储层可压裂性标准,该样品压裂较为有利,同样样品2的岩石力学性质实验结果也有利于压裂。

一般认为泥页岩储层中天然裂缝越发育,2个方向的水平应力差越小,越容易在压裂过程中形成复杂的缝网体系^[30]。从苏2井营一段泥页岩地应力测试结果(表2)来看,苏2井垂向主应力均大于水平主应力,按照岩石在不同方向应力大小情况下的裂缝发育理论^[17]来看,该样品在压裂过程中以形成垂直缝为主;此外,垂向主应力和最大水平主应

表1 松辽盆地梨树断陷苏家屯洼陷
苏2井营一段泥页岩单轴力学实验结果

Table 1 Uniaxial mechanical experiment results for mud shale from the first member of the Yingcheng Formation, well Su2, Sujiatun Sag, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

样号与井深/m	试样编号	抗压强度/ MPa	杨氏模量/ MPa	泊松比	
样品1 3 157.81~3 158.04	垂1	152.89	39 342	0.208	
	垂2	141.07	38 305	0.198	
	垂3	146.93	39 394	0.191	
	平均	146.96	39 014	0.199	
	平0°	150.52	41 486	0.193	
	平45°	185.28	46 528	0.199	
	平90°	174.32	42 497	0.199	
	平均	170.04	43 504	0.197	
	样品2 3 311.41~3 311.81	垂1	156.69	40 170	0.193
		平0°	137.17	36 592	0.198
平45°		115.22	38 129	0.187	
平90°		102.50	35 801	0.193	
平均		118.30	36 841	0.193	

力相差较小,最大、最小水平井主应力相差大,说明压裂时形成的压裂缝形态较为单一。综合考虑到苏2井泥页岩脆性矿物含量高和天然裂缝较发育,认为苏2井营一段泥页岩应能够形成一定规模的裂缝网络,有利于页岩的压裂改造和天然气运移聚集。

3 含气性

苏2井录井过程中在营城组一段3 156~3 161.17 m井段气测全烃100%、甲烷89.397%,3 259~3 265 m井段气测全烃25.514%、甲烷18.327%,具有气层的特征。除苏2井外,苏家屯地区多口探井在营一段泥页岩及其薄砂条中均发现了气测异常和气显活跃,如梨2、SW30、SW332、SW333、SW335、SW33X井等在沙河子组及营城组一段均钻遇高气测显示。对苏2井营一段3 158.6~3 161.6 m段泥页岩中所夹的薄层砂岩进行压裂测试,获得了日产超过 3×10^4 m³的页岩气产量;梨2井营一段2 823.2~2 825.1 m段薄砂质条带压裂后获得日产最高超过 5×10^4 m³的页岩气产量。苏2井营一Ⅱ段泥页岩总厚度为111 m,砂地比为19.16%;梨2井营一Ⅱ段泥页岩总厚度为117 m,

砂地比仅为9.05%,均符合财政部出台的页岩气开发利用补贴标准。从地层对比情况来看,苏2井和梨2井压裂后获得高产气流的测试层均位于营一段中上部,这套含气层分布比较稳定,在地震上可以连续追踪,下步可以优先考虑对这套含气目的层进行压裂,预期会获得较好的页岩气产能。除上述进行测试的含气层系外,苏家屯地区多口探井在营一段泥页岩所夹的薄砂质条带中见到多层含气显示,显示出该区具有良好的页岩气勘探前景。

除了测井解释和试气成果外,页岩含气性评价中还涉及到一项重要的参数,即含气量参数。含气量是页岩气资源评价中最直接也是最重要的一项参数,同时还直接决定了该套泥页岩是否具有经济开发价值。目前,含气量参数可以通过直接或间接的方法获得,如等温吸附法、测井解释法、现场解吸法等,其中现场解吸法最为直接和常用^[31]。为了准确获得苏家屯地区营一段泥页岩的含气量数据,苏2井在钻进过程中开展了现场解吸工作,累计做了8个样品的现场解吸测试,获得了解吸气和残余气量数据,并对损失气量进行了恢复,得到8个样品的总含气量数据,含气量范围为0.77~4.64 m³/t,平均为2.5 m³/t。参照我国目前所采用的页岩气选区评价标准^[32],单从含气量这项参数来看,苏家屯地区营一段泥页岩均达到了核心区的评价标准;而国外对页岩气的开发一般要求含气量要达到2.0 m³/t以上,苏2井8个样品中也有4个样品的含气量达到了2.0 m³/t以上,显示苏家屯地区营一段具有良好的页岩气勘探开发前景。

前人研究表明,页岩含气量,尤其是吸附气含量与有机质含量关系密切,二者之间一般呈现出良好的正相关关系。本次对苏2井8个泥页岩样品的实测含气量和TOC数据进行了相关性分析(图9),分析表明两者之间呈现一定的正相关关系,但并没有良好的线性关系,这主要是由于样品1和样品8含气量过高所致,剔除这2个样品之后,两者之间的相关系数可以达到0.8左右,表明有机碳含量是影响含气量最重要的因素。除有机质外,页岩中无机组分的相对组成也影响页岩对气体的吸附能

表2 松辽盆地梨树断陷苏家屯洼陷苏2井营一段泥页岩地应力测试结果

Table 2 Ground stress test results for mud shales from the first member of the Yingcheng Formation, well Su2, Sujiatun Sag, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

样号与井深/m	Kaiser点对应的应力值/MPa				地应力梯度/(MPa·hm ⁻¹)		
	垂直	0°	45°	90°	SV	SH	Sh
样品1,3 157.81~3 158.04	46.87	42.20	40.44	32.20	2.33	2.20	1.85
样品2,3 311.51~3 311.81	50.10	43.65	36.29	32.80	2.36	2.19	1.82

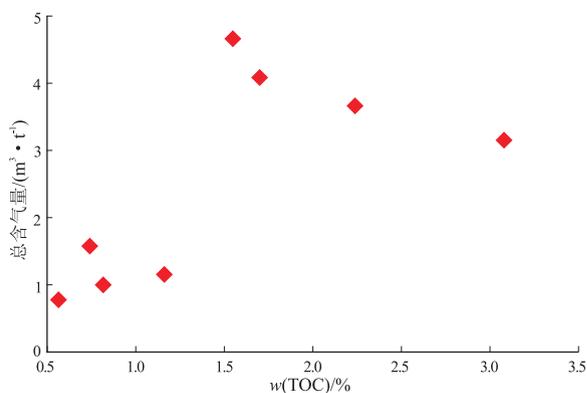


图 9 松辽盆地梨树断陷苏家屯洼陷

苏 2 井营城组一段 8 个泥页岩样品含气量与 TOC 拟合关系

Fig.9 Relationship between gas content and TOC in eight mud shale samples from the first member of the Yingcheng Formation, well Su2, Sujiatun Sag, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

力^[15];此外,还受页岩外部因素,包括泥页岩埋深、压力及温度等的影响^[33]。

4 结论

(1)苏家屯洼陷构造相对稳定,断裂不发育。营一段泥页岩单层厚度大,连续性好,且有机质丰度高,类型以 II₁、II₂型为主,达高熟—过熟演化阶段,页岩气生成条件有利。

(2)营一段泥页岩脆性矿物含量高,可压性较好;泥页岩孔隙度和渗透率普遍较低,但不同级别的天然裂缝、微裂缝及微—纳米孔隙发育,且主要以微孔和中孔为主;泥页岩孔隙比表面积普遍较高,为页岩气提供了有利的吸附空间。

(3)从岩石力学性质来看,苏家屯地区营一段泥页岩杨氏模量高、泊松比低,压裂条件有利;垂向主应力大于水平主应力,且垂向主应力和最大水平主应力相差较小,最大、最小水平主应力相差大,表明压裂过程中以形成形态较为单一的垂直缝为主。

(4)苏家屯地区多口井在营一段泥页岩及其薄砂条中见到良好的气测显示,并试获了高产气流;泥页岩现场解吸含气量平均在 2.5 m³/t,显示出良好的勘探开发前景。

参考文献:

- [1] 宋振响,周卓明.梨树断陷主力烃源岩判定及其地球化学特征[J].石油实验地质,2013,35(4):438-444.
Song Zhenxiang,Zhou Zhuoming.Identification of chief hydrocarbon source rocks in Lishu Fault Depression and their geochemical characteristics [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(4):438-444.
- [2] 韩娇艳,黄党委,徐红波.梨树断陷苏家屯地区沉积体系及油藏特征研究[J].内蒙古石油化工,2012(15):128-130.

Han Jiaoyan,Huang Dangwei,Xu Hongbo.Study on sedimentary systems and reservoir characteristics in Sujiatun area of Lishu Fault Depression [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012(15):128-130.

- [3] 卜翠萍,苏玉山,魏红红,等.松辽盆地南部十屋断陷成藏期次研究[J].成都理工大学学报:自然科学版,2007,34(2):147-151.
Bu Cuiping,Su Yushan,Wei Honghong,et al.Study on the period and time of oil and gas accumulation in the Shiwu Fault Depression of the southern Songliao Basin,China [J].Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2007,34(2):147-151.
- [4] 张玉明.松辽盆地南部十屋断陷北部深层油气成藏条件[J].石油天然气学报,2006,28(3):53-56.
Zhang Yuming.Conditions of hydrocarbon accumulation of deep reservoirs in the north of Shiwu Fault Depression in the south of Songliao Basin [J].Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(3):53-56.
- [5] 孙大明,李明诚.松辽盆地南部十屋断陷天然气成藏条件定量研究[J].石油勘探与开发,2000,27(4):84-86.
Sun Daming,Li Mingcheng.A quantitative study on formation of gas pool in Shiwu Fault Depression of Songliao Basin [J].Petroleum Exploration & Development,2000,27(4):84-86.
- [6] 贾宏伟,康立功.十屋断陷构造发育特征及油气分布研究[J].安徽地质,2004,14(3):180-184.
Jia Hongwei,Kang Ligong.Development features of Shiwu rifting depression structure and oil-gas distribution research [J].Geology of Anhui,2004,14(3):180-184.
- [7] 覃素华,袁智广,刘福春.松南盆地十屋断陷油气成藏条件分析[J].天然气勘探与开发,2003,26(2):77-84.
Qan Suhua,Yuan Zhiguang,Liu Fuchun.Analysis of hydrocarbon accumulation conditions in Shiwu rifting depression, southern Songliao Basin [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2003,26(2):77-84.
- [8] 于荣泽,卞亚南,张晓伟,等.页岩储层流动机制综述[J].科技导报,2012,30(24):75-79.
Yu Rongze,Bian Yanan,Zhang Xiaowei,et al.A review of flow mechanisms in shale gas reservoir [J].Science & Technology Review,2012,30(24):75-79.
- [9] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等.常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望:以中国致密油和致密气为例[J].石油学报,2012,33(2):173-187.
Zou Caineng,Zhu Rukai,Wu Songtao,et al.Types,characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations; Taking tight oil and tight gas in China as an instance [J].Acta Petrolei Sinica,2012,33(2):173-187.
- [10] 于炳松.页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J].地学前缘,2012,19(3):252-258.
Yu Bingsong.Particularity of shale gas reservoir and its evaluation [J].Earth Science Frontiers,2012,19(3):252-258.
- [11] 周卓明,沈忠民,张玺,等.松辽盆地梨树断陷苏家屯次洼页岩气成藏条件分析[J].石油实验地质,2013,35(3):263-268.
Zhou Zhuoming,Shen Zhongmin,Zhang Xi,et al.Accumulation conditions of shale gas in Sujiatun sub-Depression,Lishu Fault Depression, Songliao Basin [J]. Petroleum Geology &

- Experiment, 2013, 35(3): 263-268.
- [12] 陈新军, 包书景, 侯读杰, 等. 页岩气资源评价方法与关键参数探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 566-571.
Chen Xinjun, Bao Shujing, Hou Dujie, et al. Methods and key parameters of shale gas resources evaluation [J]. Petroleum Exploration & Development, 2012, 39(5): 566-571.
- [13] 张金川, 金之均, 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. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [14] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 17-21.
Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 17-21.
- [15] 张林晔, 李政, 朱日房. 页岩气的形成与开发[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 124-128.
Zhang Linye, Li Zheng, Zhu Rifang. The formation and exploitation of shale gas [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(1): 124-128.
- [16] Chong K K, Grieser W V, Passman A. A completions guide book to shale-play development: A review of successful approaches towards shale-play stimulation in the last two decades [C] // Proceedings of Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, 19-21 October 2010, Calgary, Alberta, Canada: CSUG/SPE, 2010.
- [17] 唐颖, 邢云, 李乐忠, 等. 页岩储层可压裂性影响因素及评价方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 356-363.
Tang Ying, Xing Yun, Li Lezhong, et al. Influence factors and evaluation methods of the gas shale fracability [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 356-363.
- [18] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: Contributions in petroleum geology and engineering [M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985: 320.
- [19] 付小东, 秦建中, 腾格尔, 等. 烃源岩矿物组成特征及油气地质意义: 以中上扬子古生界海相优质烃源岩为例[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 671-684.
Fu Xiaodong, Qin Jianzhong, Tenger, et al. Mineral components of source rocks and their petroleum significance: A case from Paleozoic marine source rocks in the Middle - Upper Yangtze region [J]. Petroleum Exploration & Development, 2011, 38(6): 671-684.
- [20] Thyberg B, Jahren J. Quartz cementation in mudstones: Sheet-like quartz cement from clay mineral reactions during burial [J]. Petroleum Geoscience, 2011, 17(1): 53-63.
- [21] 刘立, 王力娟, 杨永智, 等. 松辽盆地南部 HX 井上白垩统青山口组黑色泥岩的矿物组成与自生微晶石英成因[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(5): 1358-1365.
Liu Li, Wang Lijuan, Yang Yongzhi, et al. Mineral composition and origin of authigenic quartz crystals in black mud-stone, in well HX, Qingshankou Formation, Upper Cretaceous, Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(5): 1358-1365.
- [22] 斯麦霍夫 E M. 裂缝性油气储集层勘探的基本理论与方法 [M]. 曾志琼, 吴丽芸, 译. 北京: 石油工业出版社, 1985.
Смехов Е М. Basic theory and method of fractured reservoir exploration [M]. Zeng Zhiqiong, Wu Liyun, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985.
- [23] 龙鹏宇, 张金川, 唐玄, 等. 泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 525-532.
Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Tang Xuan, et al. Feature of muddy shale fissure and its effect for shale gas exploration and development [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 525-532.
- [24] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.
- [25] 邹才能, 杨智, 崔景伟, 等. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(1): 14-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [26] Rouquerol J, Avnir D, Fairbridge C W, et al. Recommendations for the characterization of porous solids [J]. Pure and Applied Chemistry, 1994, 66(8): 1739-1758.
- [27] Ross D J K, Bustin R M. 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
Dong Bingxiang, Chen 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.
- [30] 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.
- [31] 唐颖, 张金川, 刘珠江, 等. 解吸法测量页岩气含量及其方法的改进[J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 108-112.
Tang Ying, Zhang Jinchuan, Liu Zhujiang, et al. Use and improvement of the desorption method in shale gas content tests [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 108-112.
- [32] 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 等. 页岩气资源评价方法与技术: 概率体积法[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 184-191.
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. The method of shale gas assessment: Probability volume method [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 184-191.
- [33] 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 Haikuang, 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.