

松辽盆地梨树断陷 苏家屯次洼页岩气成藏条件分析

周卓明^{1,2}, 沈忠民¹, 张玺³, 宋振响²

(1. 成都理工大学 能源学院, 成都 610059; 2. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 3. 中国石化东北油气分公司 勘探开发研究院, 长春 130062)

摘要:通过对松辽盆地梨树断陷苏家屯次洼基本油气地质特征分析,认为营城组一段形成于断陷发育的鼎盛时期,发育稳定的大套泥岩夹薄砂岩地层。地化特征表明该段泥页岩具有有机质丰度较好、有机质类型丰富、热演化处于生气的成熟—高成熟阶段等特点。泥页岩中平均孔隙度达到3.52%,裂缝和微裂缝相对较发育,不仅可以为游离态气提供有利的储集空间,且脆性矿物含量相对较高,平均为41.1%,石英含量在15.1%~23.4%之间,岩石具有较好的可压性。钻井现场解析结果表明该段泥页岩中含气最高可达3.09 m³/t,且钻井气测全烃异常以及测试资料也表明该区页岩气的存在,说明该泥页岩中蕴藏着一定规模的页岩气资源,具有良好的资源前景和勘探潜力。

关键词:页岩气;成藏条件;苏家屯次洼;梨树断陷;松辽盆地

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Accumulation conditions of shale gas in Sujiatun Sub-depression, Lishu Fault Depression, Songliao Basin

Zhou Zhuoming^{1,2}, Shen Zhongmin¹, Zhang Xi³, Song Zhenxiang²

(1. School of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

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

3. Exploration and Development Research Institute of SINOPEC Northeast Oil and Gas Company, Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: The geologic features of the Sujiatun Sub-depression in the Lishu Fault Depression indicated that during the heyday of fault depression development, a large set of mudstone interbedded with sandstone generated stably in the first member of the Yingcheng Formation. This set of shale is characterized by rich organic content, various organic types and is mature and high-mature for gas generation. The average porosity is 3.52% and a mass of fractures can be observed, providing room for free gas accumulation. In addition, the content of brittle minerals is relatively higher, with an average value of 41.1%. The content of quartz ranges from 15.1% to 23.4%. The shale is easy to crack. Field works have shown that the highest gas content in the shale may amount to 3.09 m³/t. The abnormality in total hydrocarbon measuring also predicts the existence of shale gas, indicating for good potential.

Key words: shale gas; accumulation condition; Sujiatun Sub-depression; Lishu Fault Depression; Songliao Basin

2009年美国天然气开采量达到6 235×10⁸ m³,超过俄罗斯的5 829×10⁸ m³成为全球天然气产量第一大国。截止2011年,美国已经连续3年年天然气开采量超过6 200×10⁸ m³而稳坐全球第一宝座。众所周知,这主要得益于页岩气的开发利用。对于页岩气等非常规天然气的勘探、开发已经引起世界各国高度的重视。虽然理论上泥岩和页岩都属于黏土岩,有无页理是其主要差异,但国外研究

者所指的页岩包括了我們通常所指的泥岩和页岩。页岩气是指以吸附和游离状态为主要存在方式,主体位于暗色、高碳泥页岩及其夹层状系列薄砂岩聚集的天然气。是天然气生成后在源岩层内就近聚集、大规模滞留的典型的“原地”成藏的结果^[1-3]。笔者通过对梨树断陷苏家屯次洼含气泥页岩段的有机地化特征、储层特征、含气性以及可压裂改造性等成藏条件分析,认为梨树断陷苏家屯次洼营城

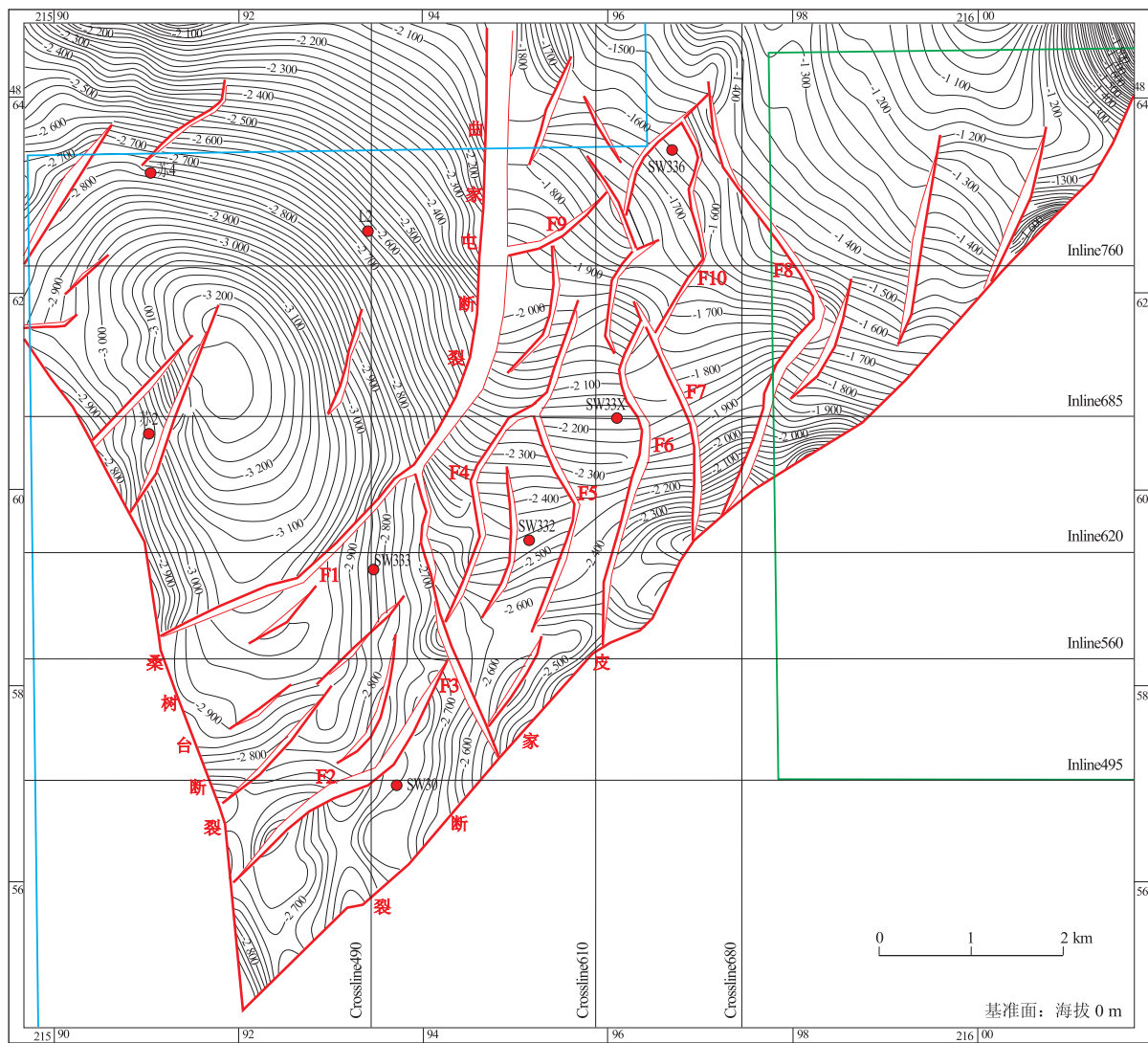


图1 梨树断陷苏家屯次洼营城组一段顶面构造

Fig.1 Structural map of top surface of 1st member of Yingcheng Formation, Sujiatun Sub-depression, Lishu Fault Depression

组地层中蕴藏有页岩气资源,且具有一定勘探潜力。

泥岩夹薄砂岩地层,有利于页岩气的形成和保存。

1 构造地质背景

2 泥页岩分布

苏家屯次洼位于梨树断陷西北部,皮家走滑断裂以西,为一相对独立的次洼,面积 165 km²。苏家屯次洼整体上表现为南断北剥、东西超覆的特征(图1)。在断陷沉积期,与梨树断陷主体相连,受区域构造运动和皮家断裂长期活动影响,洼陷南部表现为受皮家走滑断裂控制形成的桑树台次洼的断阶;洼陷北部受南北向曲家屯断层分割形成西部洼陷带和东部断阶带。东部断阶带经历了火石岭组沉积末期和营城组沉积末期2期构造运动,形成了一系列近南北向的断块。到登娄库组沉积末期,苏家屯次洼北部整体抬升并遭受剥蚀,在东部断阶带形成了多个地层向北抬升的断块。而西部洼陷带地层沉积稳定且断层不发育,沉积有稳定的大套

和梨树断陷主体的构造演化以及沉积环境相似,苏家屯次洼在沙河子组沉积后期以及营城组沉积早期进入断陷发育的鼎盛时期,水体范围较大,发生白垩纪以来最大规模的水进,是白垩纪水体最深的时期,形成了一套富含有机质的以深灰、灰黑色泥岩为主的地层,发育了沙河子组三、四段和营城组一段等3套烃源岩,主要为深湖—半深湖相泥岩。其中,沙三、沙四段地层沉积较薄,各段地层厚度大多不超过50 m,暗色泥岩厚度不超过30 m;而营一段地层厚度超过300 m,其中暗色泥岩厚度超过250 m(图2),是页岩气发育的重要层段。

平面上,暗色泥岩主要分布在苏家屯次洼西部靠近控制沉积的桑树台断裂东侧深洼区。东北部沿

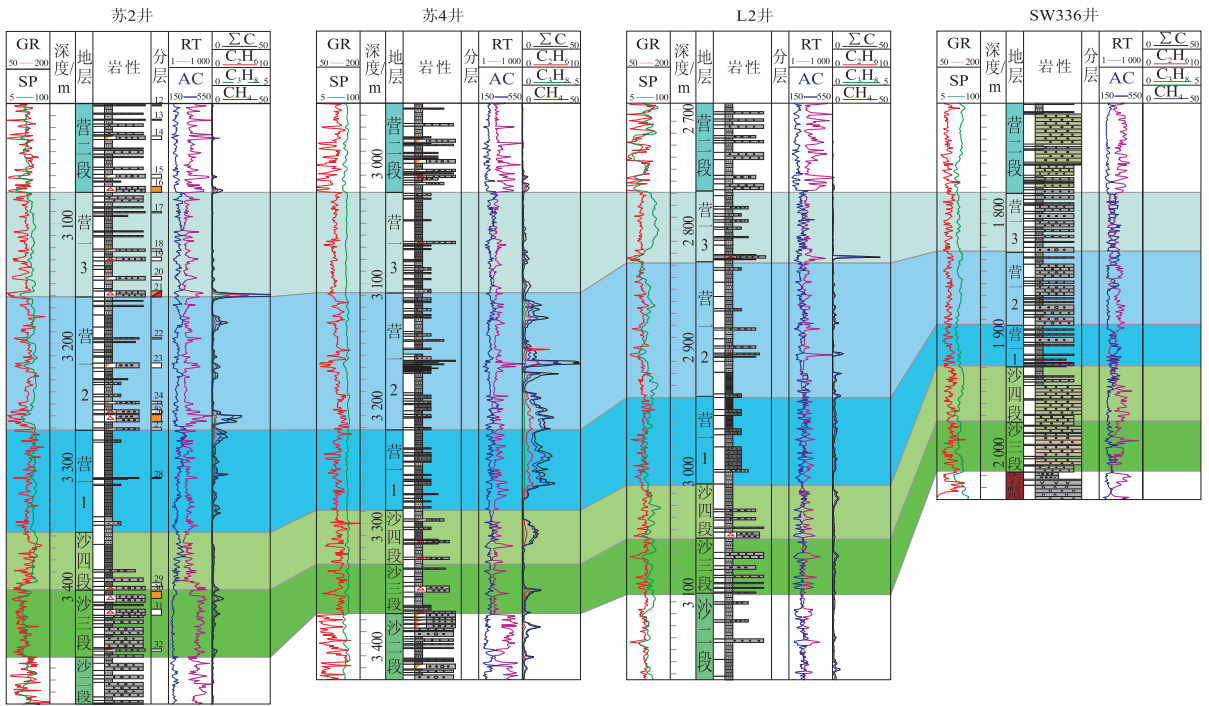


图2 梨树断陷苏家屯次洼营一段顶拉平后苏2-苏4-L2-SW336井连井地层对比剖面

Fig.2 Stratigraphic profile crossing wells Su2, Su4, Li2 and SW336 in Sujiatun Sub-depression, Lishu Fault Depression

皮家断裂轴向发育扇三角洲沉积,地层沉积变薄且岩性变粗,以灰色砂岩细砂岩沉积为主夹少量泥岩(图2)。因此,苏家屯次洼页岩气发育主要部位也以西部洼陷带为主。

3 页岩气成藏条件分析

3.1 泥页岩地球化学特征

影响页岩气成藏的主要因素是烃源岩的有机碳含量及其生气作用^[4]。通过实测苏家屯次洼苏2井泥页岩样品的地球化学参数(图3),营一段泥页岩样品有机质丰度总体较高,TOC含量多分布在0.5%~4.0%之间,均值为1.76%,其中, $\omega(\text{TOC}) > 2.0\%$ 的样品将近40%,有机碳最高值可达4.0%以上,显示出较大的生烃潜力。相比之下,这些样品的氯仿沥青“A”含量均较低,大多低于0.01%,这主要与该区烃源岩热演化程度较高有关。同样受成熟度较高的影响,反映出其热解烃 S_1 含量也较低,大多小于0.5 mg/g,均值只有0.08 mg/g。平面上,苏家屯次洼西部洼陷带营一段泥页岩TOC含量较高,多口井平均值均大于1.0%(苏4井为1.11%,L2井为1.05%);而东部断阶带的SW30井营一段平均TOC含量只有0.64%。

根据显微组分和有机元素分析结果,苏家屯次洼营一段泥页岩有机质类型较好,苏2井显示其干酪根类型以腐泥型(I型)、腐殖腐泥型(II₁)和腐

泥腐殖型(II₂)为主(图3),但是在不同地区干酪根类型存在明显差异,L2井以及SW30井营一段泥页岩干酪根类型就以II₂和III型干酪根为主。

苏2井的测试分析结果表明,营一段泥页岩成熟度较高, R_o 值在1.7%~2.3%之间(图3),进入大量生气阶段。SW30井、L2井等资料也证实,其营一段泥页岩 R_o 值在0.96%~1.33%之间,均值为1.19%。这种成熟度特征与目前苏家屯次洼内分布的油气特征一致,也表明苏家屯次洼具备一定的页岩气勘探潜力。

3.2 泥页岩储层特征

页岩气成藏特点表明泥页岩本身既是烃源岩又是储集层,而泥页岩类基质孔隙极不发育,多为微毛细管孔隙,渗透率也远小于致密砂岩,属于渗透率极低的沉积岩。苏2井系统取心的泥页岩孔隙分析测试结果表明(表1),营一段泥页岩孔隙度分布在0.89%~5.8%之间,平均3.52%;渗透率最高为 $1.54 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,具备相对较好的孔隙储集性能。

根据国外已开发利用的页岩气藏分析,Fort Worth盆地Newark East气田Barnett组页岩气产量与页岩内部微裂缝发育紧密相关;Illinois盆地New Albany组页岩经济可采储量有同样的特点;而Michigan盆地北部Antrim组页岩气田也主要发育NW和NE两组近垂直的天然裂缝。表明泥页岩受

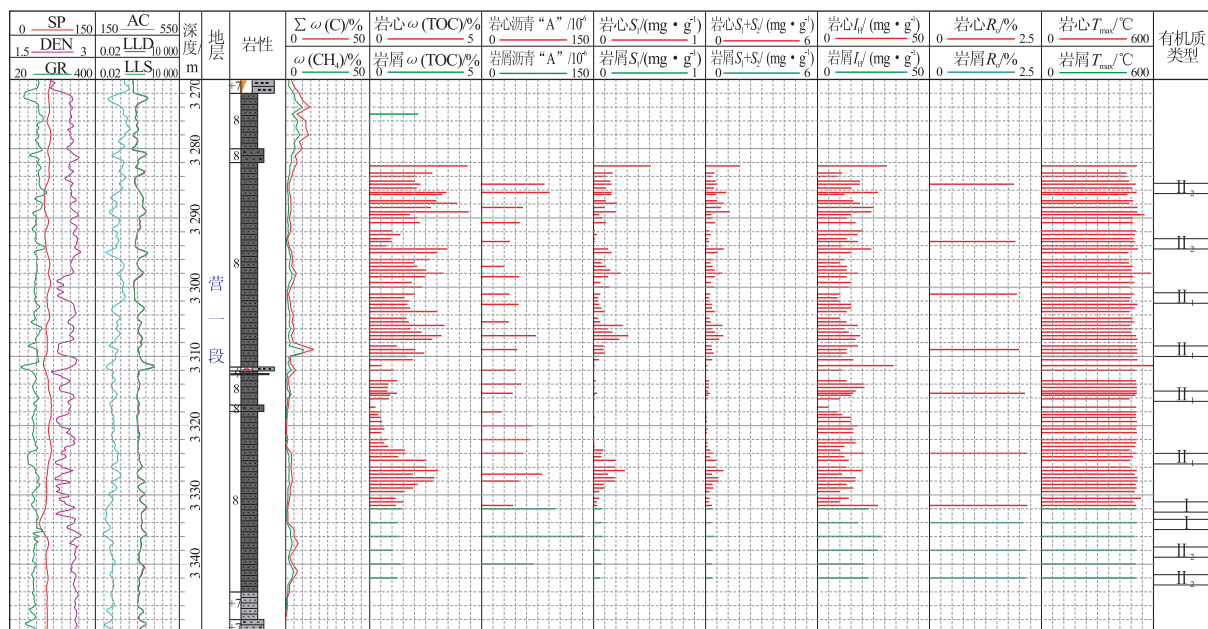


图 3 梨树断陷苏 2 井营一段地球化学剖面

Fig. 3 Geochemical profile of 1st member of Yingcheng Formation in well Su2, Lishu Fault Depression

表 1 梨树断陷苏 2 井营一段泥页岩视密度及物性数据

Table 1 Apparent density and physical property of shale from 1st member of Yingcheng Formation in well Su2, Lishu Fault Depression

井深/m	孔隙率/%	视密度/ (g · cm ⁻³)	渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)
3 282.80	3.40	2.42	
3 288.50	4.76	2.59	0.014 1
3 290.70	5.12	2.56	
3 294.00	2.93	2.61	
3 298.50	2.88	2.67	
3 302.50	5.17	2.61	1.54
3 307.00	2.61	2.54	0.001 16
3 312.00	5.80	2.58	
3 318.00	2.27	2.59	
3 322.00	0.89	2.63	
3 327.00	2.86	2.57	

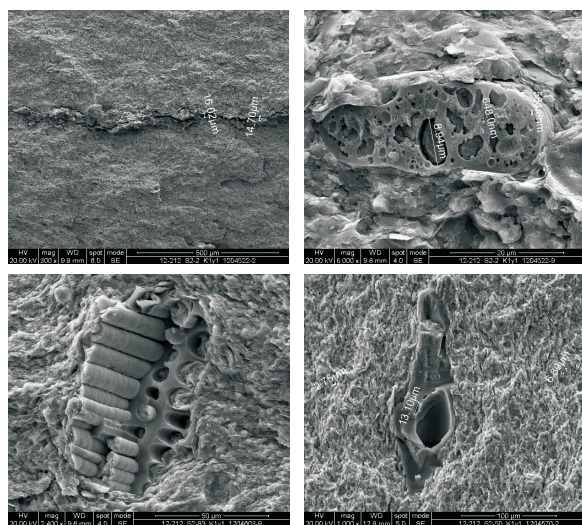


图 4 梨树断陷苏家屯次洼苏 2 井营一段泥页岩电镜扫描图片

Fig. 4 SEM of shale from 1st member of Yingcheng Formation in well Su2,

Sujiatun Sub-depression, Lishu Fault Depression

构造应力、成岩作用、有机质演化等诸多因素的综合影响,能形成一定规模、渗透性较好的裂缝性泥页岩油气藏。裂缝改善了泥页岩的渗流能力,其不仅作为储集空间,也是渗流通道,是页岩气从基质孔隙流入井底的必要途径^[5]。

孔隙种类对页岩储集类型、含气和聚气特征有重要影响,有学者将泥页岩孔隙类型划分为有机质(沥青)孔、矿物质孔(矿物比表面、晶内孔、晶间孔、溶蚀孔和杂基孔隙等)和两者之间的孔隙等 3 类^[6]。从苏 2 井营一段泥页岩的扫描电镜分析结果来看(图 4),营一段泥页岩层间裂缝发育,且多被高等植物残体充填,粘土矿物顺层发育,且多发育微孔隙、有机质孔以

及气孔等,具备较好的天然气储集空间。

富含石英的黑色泥页岩段脆性较强,裂缝的发育程度比富含方解石的泥页岩高^[7]。Nelson 认为除了石英以外,长石和白云石也是泥页岩段中的易脆组分^[8]。脆性矿物含量的高低不仅是影响裂缝发育的重要因素,也直接影响泥页岩后期压裂改造的效果。理想的含气页岩矿物组分特征表现为富含石英、碳酸盐岩等脆性矿物,且粘土含量小于 30%^[9]。从苏家屯次洼营一段泥页岩矿物含量分析显示,粘土矿物含量多分布在 39.2% ~ 67.9% 之间;脆性矿

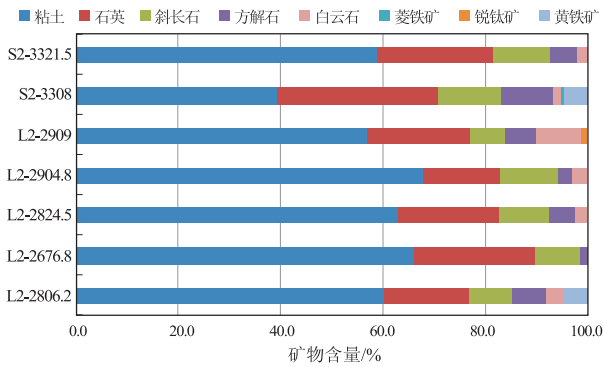


图5 梨树断陷苏家屯次洼营一段泥页岩矿物含量分布
Fig.5 Mineral content in shale from 1st member of Yingcheng Formation, Sujiatun Sub-depression, Lishu Fault Depression

物含量相对也较高,多分布在 32.1% ~ 60.8% 之间,平均值为 41.1%,其中,石英含量分布在 15.1% ~ 23.4% 之间(图5),虽然比不上美国产气页岩中石英含量为 28% ~ 52%,总脆性矿物含量为 46% ~ 50%^[10] 的水平,但岩石仍具有较好可压性。

4 页岩气显示

页岩气是以吸附和游离状态同时存在于泥页岩地层中^[11-12]。吸附态是页岩气存在的主要赋存状态之一,页岩气的解吸是吸附的逆过程,页岩气的解吸率与页岩中泥质含量及页理发育程度有关^[13]。泥页岩的吸附能力与泥页岩的介质条件(吸附水 pH 值、矿物质含量)、矿物组成、有机质的丰度、类型及成熟度有密切关系^[14]。对苏家屯次洼苏 2 井营一段 8 个样品进行了现场解析实验(表 2),含气量范围为 0.62 ~ 3.09 m³/t,平均为 1.67 m³/t,与泥页岩的有机碳含量相关性较好。相较于国外各典型页岩,除较 San Juan 盆地的 Lewis 页岩含气高外,营一段较国外典型油页岩含气量均较低,但是相对于国内各盆地,除了低于苏北盆地页岩含气量外,较元坝、彭水区块、泌阳凹陷和湘鄂西地区均要高些(表 3)。

表 2 梨树断陷苏 2 井营一段样品实测含气量及 TOC 值

Table 2 Tested and calculated gas contents in 8 samples from 1st member of Yingcheng Formation in well Su2, Lishu Fault Depression

样号	样品深度/m	实测总含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	ω(TOC)/%
1	3 304.65 ~ 3 304.85	2.8	1.64
2	3 308.96 ~ 3 309.16	2.09	2.04
3	3 312.06 ~ 3 312.28	0.803 137	1.10
4	3 314.09 ~ 3 314.27	0.717 195	0.82
5	3 319.02 ~ 3 319.23	0.62	0.51
6	3 322.72 ~ 3 322.97	1.04	0.82
7	3 326.31 ~ 3 326.51	2.13	3.08
8	3 329.45 ~ 3 329.66	3.09	1.56

表 3 梨树断陷苏 2 井营城组一段实测含气量与国内外含气量对比数据

Table 3 Tested gas content of 1st member of Yingcheng Formation in well Su2 in Lishu Fault Depression vs. other gas contents at home and abroad

地区或盆地	钻井	层位或页岩名称	有机碳/%	含气量/(m ³ ·t ⁻¹)
湘鄂西	河页 1 井	龙马溪组	1 ~ 4	0.74 ~ 0.86
泌阳凹陷	泌页 HF1 井	核桃园组		1.572
元坝区块	元陆 4 井	千佛崖组		1.365
元坝区块	元陆 4 井	大安寨段		1.49
彭水区块	彭页 1 井	千佛崖组		1.4
苏北盆地		阜宁组四段		1.87
		阜宁组二段		2.91
		泰州组二段		2.2
Fort Worth		Barnett	2	9.91
Louisiana Salt		Haynesville	5	9.34
Appalachian		Marcellus	3	2.83
Michigan		Antrim	3	2.83
Illinois		New Albany	1	2.27
San Juan		Lewis	4	1.3
苏家屯次洼	苏 2 井	营一段	1.01	1.67

通过对苏家屯次洼探井资料的复查,发现泥页岩段中微裂缝和裂缝发育,存在钻时曲线异常(岩性差异)、钻井液漏失(裂缝发育)、气测全烃高异常等含气现象。多口探井的营一段暗色大套暗色泥岩夹薄层砂岩段具有明显含气显示(图 2),L2 井对营一段含气泥页岩段中薄砂条 1.9 m/1 层进行测试,常规测试产量为 6 036 m³/d,压裂后日产气 43 000 m³、油 0.36 m³;苏 2 井对同一砂体 3 m/1 层进行测试,压裂后也获得日产气 31 737 m³。

5 结论

1) 苏家屯次洼营一段发育大套厚度大、有机碳含量高、有机质类型丰富、成熟度较高的泥页岩,具备形成工业性页岩气藏的物质基础。

2) 苏家屯次洼营一段泥页岩中孔隙度、微裂缝和裂缝相对较发育,不仅可以为游离态气提供有利的储集空间,且脆性矿物含量也可达 40% 左右,具有一定的可压性。

3) 钻井现场解析结果表明苏家屯次洼营一段泥页岩中含气较高,且钻井气测全烃异常以及测试资料也表明该区页岩气的存在。说明该泥页岩中蕴藏着一定规模的页岩气资源。

参考文献:

[1] Curtis J B. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1921-1938.

[2] 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):14-18.

[3] 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.

[4] 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,2012,29(5):566-571.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 聂海宽,唐玄,边瑞康. 页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J]. 石油学报,2009,30(4):484-491.

[8] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs: Contributions in petroleum geology and engineering[M]. Houston:Gulf Publishing Company,1985:320.

[9] 陈祥,严永新,章新文,等. 南襄盆地泌阳凹陷陆相页岩气形成条件研究[J]. 石油实验地质,2011,33(2):137-141.

[10] 康玉柱. 中国非常规泥页岩油气藏特征及勘探前景展望[J]. 天然气工业,2012,32(4):1-5.

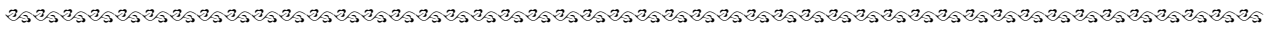
[11] 陈更生,董大忠,王世谦,等. 页岩气藏形成机理与富集规律初探[J]. 天然气工业,2009,29(5):17-21.

[12] 侯读杰,包书景,毛小平,等. 页岩气资源潜力评价的几个关键问题讨论[J]. 地球科学与环境学报,2012,34(3):7-16.

[13] 徐国盛,徐志星,段亮,等. 页岩气研究现状及发展趋势[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2011,38(6):603-610.

[14] 罗小平,刘军,徐国盛,等. 湘中拗陷泥盆—石炭系海相泥页岩地球化学特征及等温吸附性能[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2012,39(2):206-214.

(编辑 叶德燎)



(上接第254页)

[14] 张斌,黄凌,吴英,等. 强烈气洗作用导致原油成分变化的定量计算:以库车坳陷天然气藏为例[J]. 地学前缘,2010,17(4):270-279.

[15] 刘德汉,肖贤明,田辉,等. 应用流体包裹体和沥青特征判别天然气的成因[J]. 石油勘探与开发,2009,36(3):375-382.

[16] 蔡勋育,朱扬明,黄仁春. 普光气田沥青地球化学特征及成因[J]. 石油与天然气地质,2006,27(3):340-347.

[17] 赵孟军,张水昌,刘丰忠. 油藏演化的两个极端过程[J]. 石油勘探与开发,2003,30(5):21-23.

[18] 卓勤功,李勇,鲁雪松,等. 克拉苏构造带凝析油特征及对油气成藏的指示意义[J]. 天然气地球科学,2012,23(6):1097-1103.

[19] Liu Keyu, Eadington P, Coghlan D. Fluorescence evidence of polar hydrocarbon interaction on mineral surface and implications to alteration of reservoir wettability[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,2003,39(3/4):275-285.

[20] Liu Keyu, Eadington P. Quantitative fluorescence techniques for detecting residual oils and reconstructing hydrocarbon charge

history[J]. Organic Geochemistry,2005,36(7):1023-1036.

[21] 杨永才,张枝焕. 高蜡凝析油或轻质油的分布特征与成因机理[J]. 地质科技情报,2005,24(3):55-59.

[22] 卓勤功,赵孟军,谢会文,等. 克拉苏构造带大北地区储层沥青与油气运聚关系[J]. 石油实验地质,2011,33(2):193-196.

[23] 贾承造,宋岩,魏国齐,等. 中国中西部前陆盆地的地质特征及油气聚集[J]. 地学前缘,2005,12(3):3-13.

[24] 汪新,唐鹏程,谢会文,等. 库车坳陷西段新生代盐构造特征及演化[J]. 大地构造与成矿学,2009,33(1):57-65.

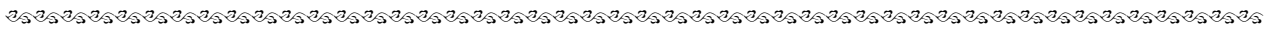
[25] 王媛,赵孟军,马玉杰,等. 库车坳陷资源潜力评价与克拉苏构造带油气富集规律研究[R]. 库尔勒:塔里木油田勘探开发研究院,2012:1-8.

[26] 汤良杰,余一欣,杨文静,等. 库车坳陷古隆起与盐构造特征及控油气作用[J]. 地质学报,2007,81(2):145-150.

[27] 付广,祝彦贺,付晓飞. F1断裂在克拉2气田形成与保存中的作用[J]. 新疆石油地质,2005,26(5):513-516.

[28] 李振生,刘德良. 塔里木北部库车地区的断层系统及其对油气的控制作用[J]. 地质科学,2009,44(1):26-34.

(编辑 徐文明)



(上接第262页)

[14] Fagereng A. Wedge geometry, mechanical strength, and interseismic coupling of the Hikurangi subduction thrust, New Zealand[J]. Tectonophysics,2011,507(1/2):26-30.

[15] Mitra S. Fold-accommodation faults[J]. AAPG Bulletin,2002,86(4):271-693.

[16] Higgins S, Davies R J, Clarke B. Antithetic fault Linkages in a deep water fold and thrust belt[J]. Journal of Structural Geology,2007,29(12):1900-1914.

[17] Kostenko O V, Naruk S J, Hack W, et al. Structural evaluation of column-height controls at a toe-thrust discovery, deep-water Niger Delta[J]. AAPG Bulletin,2008,92(12):1615-1638.

[18] Reiter K, Kukowski N, Ratschbacher L. The interaction of two

indenters in analogue experiments and implications for curved fold-and-thrust belt [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011,302(1/2):132-146.

[19] 李乐,侯贵廷,潘文庆,等. 塔里木盆地巴楚地区二叠纪以来构造应力场解析[J]. 地质力学学报,2011,17(3):262-273.

[20] 陈咪咪,田伟,张自力,等. 塔里木盆地二叠纪基性—中性—酸性岩浆岩的年代学及其地质意义[J]. 岩石学报,2010,26(2):559-572.

[21] 孟庆强,朱东亚,谢启来,等. 塔中和巴楚地区深部流体活动控制因素及有利区预测[J]. 石油实验地质,2011,33(6):597-606.

(编辑 韩 或)