

## 非常规天然气

# 四川盆地元坝地区自流井组页岩气成藏条件

郭彤楼, 李宇平, 魏志红

(中国石油化工股份有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**按照页岩气勘探思路和成藏特点, 四川盆地元坝地区一批探井针对自流井组泥页岩录取了资料, 其中3口井测试获得了工业气流。研究表明, 元坝地区自流井组形成于浅湖—半深湖环境, 暗色泥页岩厚度较大, 有机碳含量高, 有机质热成熟度适中, 处于生气高峰期。泥页岩矿物成分中石英含量普遍在60%以上, 粘土含量在30%以下, 泥页岩含气量高, 具备页岩气形成和勘探的基本条件, 是页岩气勘探的有利层系。

**关键词:**页岩气; 自流井组; 油气成藏; 元坝地区; 四川盆地

**中图分类号:** TE132.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-1926(2011)01-0001-07

**引用格式:** 郭彤楼, 李宇平, 魏志红. 四川盆地元坝地区自流井组页岩气成藏条件[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 1-7.

## 0 引言

元坝地区位于四川盆地东北部, 行政区划上属于四川省巴中和广元2市(图1), 近年来该区浅层、中层、深层常规天然气勘探不断取得突破。近期, 在元坝地区优选了4口自流井组泥页岩段进行测试, 其中3口井获得工业气流, 1口井获低产气流, 预示着元坝地区页岩气勘探具有良好前景。

## 1 自流井组区域地质特征

### 1.1 沉积与地层分布

侏罗纪由于周缘造山带的形成, 晚三叠世晚期形成的与海相连的湖盆逐渐消失, 四川盆地四周全部被古陆所包围, 中心地区演变为内陆湖泊(图1)。

自流井组属于侏罗系下统, 在四川盆地北、西边缘为白田坝组。自流井组自上而下可分为大安寨段、马鞍山段、东岳庙段和珍珠冲段(图2)。

珍珠冲段沉积早期, 由于印支晚期构造运动的作用, 米仓山隆起强烈, 使得湖水大面积退却而在山前形成冲积扇沉积, 元坝地区此时为三角洲平原沉积环境, 物源主要来自米仓山。此后, 随着湖侵的持续, 元坝地区向三角洲前缘—滨浅湖—半深湖环境

演化, 至大安寨段沉积中期达到最大湖泛。大安寨段沉积晚期, 随着湖水逐渐退却, 发育浅湖环境下的生物介壳滩。

元坝地区自流井组沉积厚度在450~600 m之间, 其中, 珍珠冲段沉积厚度在111~212 m之间, 其上部岩性为深灰色粉砂质泥岩、泥岩和灰黑色页岩与灰色细—中砂岩、灰色粉砂岩略等厚—不等厚互层; 下部为浅灰色细砂岩、灰白色砾岩、含砾中砂岩夹深灰色粉砂质泥岩、泥岩。

东岳庙段沉积厚度在82~263 m之间, 一般厚140 m左右, 岩性为深灰、灰色泥岩、粉砂质泥岩、黑色页岩与灰色粉砂岩略等厚互层。

马鞍山段沉积厚度在83~114 m之间, 岩性为灰色泥岩、绿灰色泥岩、粉砂质泥岩夹灰色粉砂岩。

以上2段为泥页岩连续发育段, 砂岩或灰岩厚度均小于2 m, 且孔隙、裂缝不发育。

大安寨段沉积厚度在70~138 m之间, 一般厚90 m左右, 岩性为深灰、灰黑色泥岩、页岩与灰色泥灰岩、粉砂岩、细砂岩略等厚互层, 局部发育浅灰色介壳灰岩。

### 1.2 构造特征

元坝地区地表为白垩系覆盖, 区域构造属于川



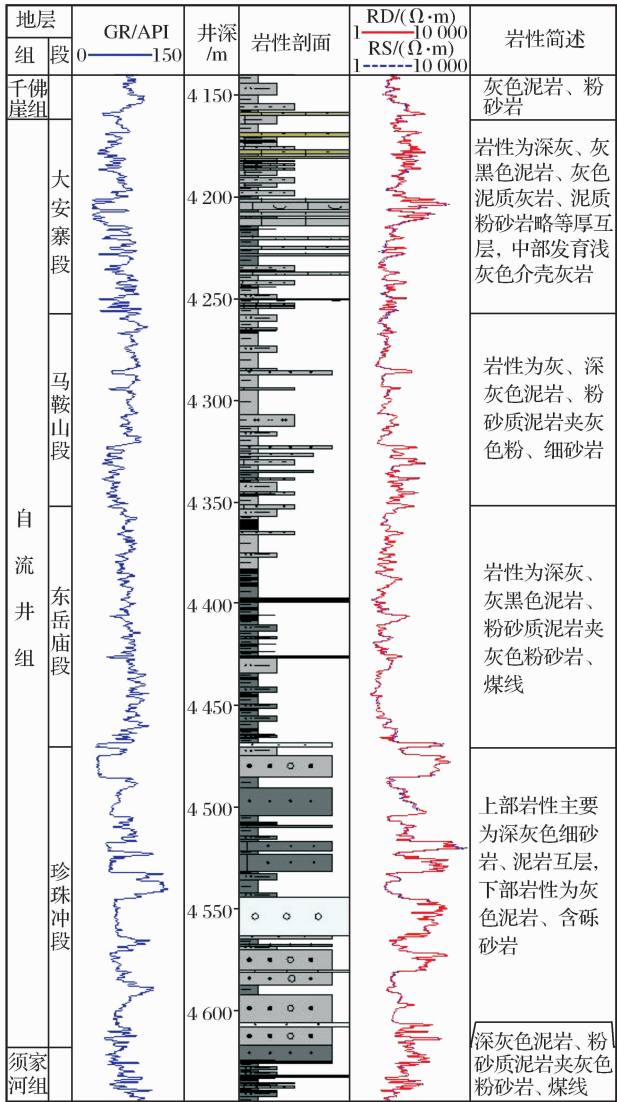


图2 元坝地区 YB101 井自流井组柱状特征

东,地层厚度、泥页岩厚度增大,东南部厚度最大,在 230 m 以上。纵向上东岳庙段泥页岩厚度相对较大,为 50~150 m(图 4),马鞍山段泥页岩厚度为 60~80 m,大安寨段泥页岩厚度为 50~80 m。

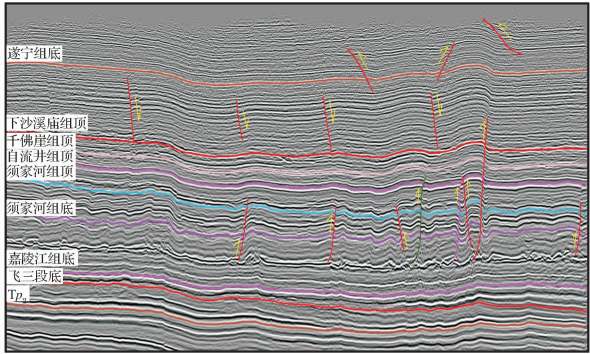


图3 元坝地区三维地震 Trace 961 测线

2 泥页岩有机地球化学特征

2.1 有机质类型及丰度

四川盆地侏罗系部分源岩(或干酪根)的显微组分鉴定结果表明:中、下侏罗统腐泥组(含壳质组,下同)组分含量很高,分布在 26%~79%之间,大部分源岩干酪根样品腐泥组组分达 50%以上,高者达 79%,有机质类型主要为Ⅱ<sub>1</sub>型,少数样品为Ⅰ型。部分源岩干酪根样品腐泥组组分相对较低(小于 50%),镜质组和惰性组组分相对较高,其有机质类型为Ⅱ<sub>2</sub>型,少数样品为Ⅱ<sub>1</sub>型<sup>[1]</sup>。中、下侏罗统烃源岩干酪根碳同位素、干酪根元素分析(川中地区)表明源岩有机质类型也主要为Ⅱ<sub>1</sub>型<sup>[2]</sup>。

有机碳含量(TOC)是页岩气评价的重要指标之

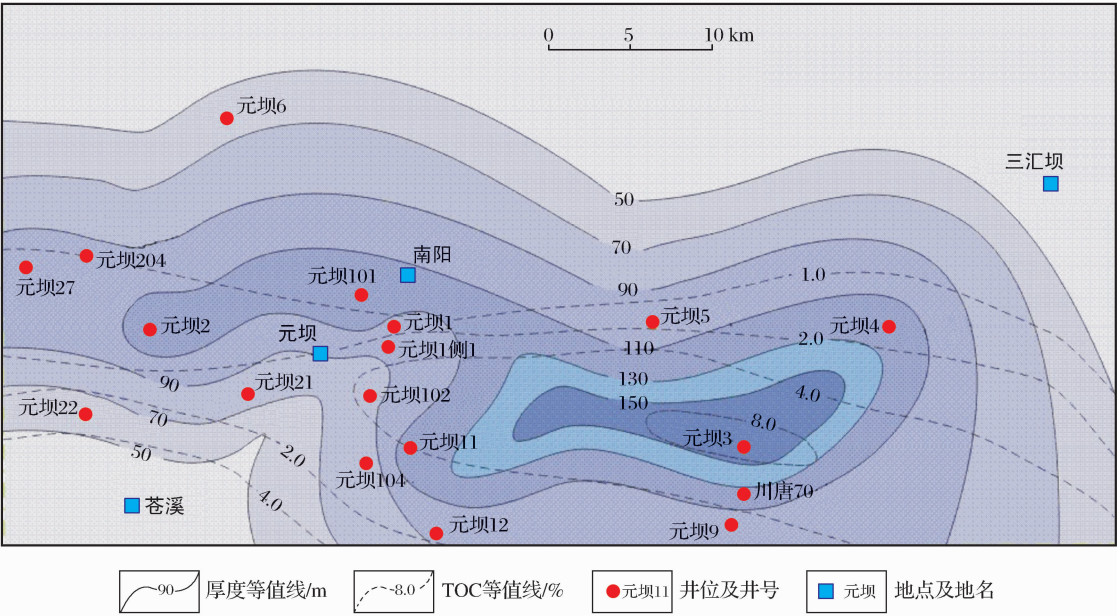


图4 元坝地区自流井组东岳庙段泥页岩厚度与有机碳含量等值线关系



—<sup>[3-6]</sup>。从元坝地区自流井组东岳庙段、马鞍山段、珍珠冲段泥页岩的有机碳含量可以看出,元坝地区自流井组东岳庙段—大安寨段泥页岩的有机碳含量最小值为0.2%,最大值为23.9%,平均有机碳含量为1.7%,有机碳含量大于1%的厚度比例为57%(图5)。其中:东岳庙段的有机碳含量最小值为0.2%,最大值为9.95%,平均有机碳含量为1.92%;马鞍山段的有机碳含量最小值为0.22%,最大值为15.64%,平均有机碳含量为2.01%;大安寨段的有机碳含量最小值为0.2%,最大值为2.24%,平均有机碳含量为1.02%。由此可见,自流井组3个段泥页岩总体有机碳含量均达到了较好烃源岩的标准<sup>[7]</sup>。

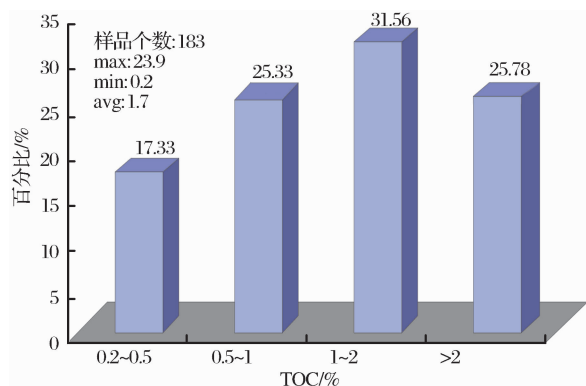


图5 元坝地区东岳庙段—大安寨段泥页岩 TOC 分布特征

纵向上,东岳庙段的有机碳含量最高,且有从下往上呈逐渐降低的趋势。平面上,元坝地区泥页岩有机碳含量南部明显较北部高、东部相对较西部高(图4),因此自流井组有机质丰度总体是东南部高于西北部。

## 2.2 成熟度及生烃演化史

元坝地区自流井组的有机质热成熟度( $R_o$ )在

1.5%~1.8%之间,演化程度适中,处于生气高峰期。横向上元坝地区自流井组成熟度处于相对高演化中心。

元坝1井埋藏史分析表明(图6),下侏罗统自流井组烃源岩于中侏罗世上沙溪庙期开始生烃,至晚侏罗世蓬莱镇期—早白垩世达到生油高峰,早白垩世晚期以来进入大量生气阶段。

## 3 含气性特征

### 3.1 储层特征

#### 3.1.1 泥页岩储层物性及储集空间

元坝地区自流井组泥页岩储层物性较好,7口井大安寨段—马鞍山段泥页岩岩心样品分析孔隙度为0.78%~3.67%,平均为2.5%,渗透率为 $(0.005 \sim 0.918) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为 $0.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

元坝地区自流井组井下泥页岩扫描电镜分析结果显示,自流井组大安寨段—东岳庙段泥页岩微孔隙发育,主要为粒间、粒内次生孔、缝,粒间、层间缝隙,晶间孔,层状次生缝隙等(图7)。微孔隙孔径约在 $2 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m} \sim 20 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 之间,面孔率普遍在5%~13%之间,具有较好的储集空间。微裂缝发育情况好,裂缝宽度为1~50 $\mu\text{m}$ (表1),有利于天然气储集和压裂改造。

#### 3.1.2 泥页岩矿物成分及岩石力学参数

元坝地区自流井组泥页岩矿物成分以石英和粘土为主,有少量方解石、长石及菱铁矿。其中石英含量普遍在60%以上,粘土含量在30%以下(表2),岩石脆性与造缝能力强,裂缝网络容易产生<sup>[8-9]</sup>。粘土矿物中伊/蒙混层和高岭石含量较高,在60%左右,水敏性强,对水力压裂有一定的影响,但粘土矿物的总体含量较低,因此总体水敏程度不大。如用

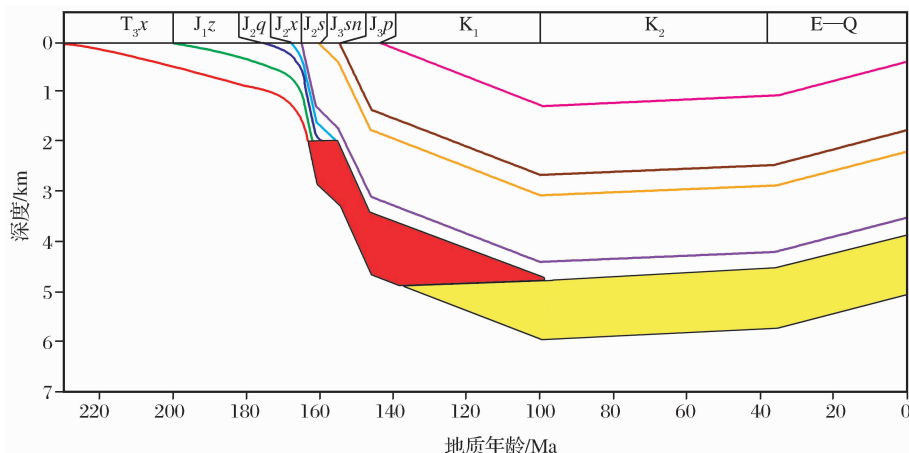


图6 元坝地区元坝1井埋藏史

岩屑膨胀率测定 YB9 井岩屑平均膨胀高度为 0.046 7 mL,平均膨胀率仅为 1.73%,属弱水敏储层。

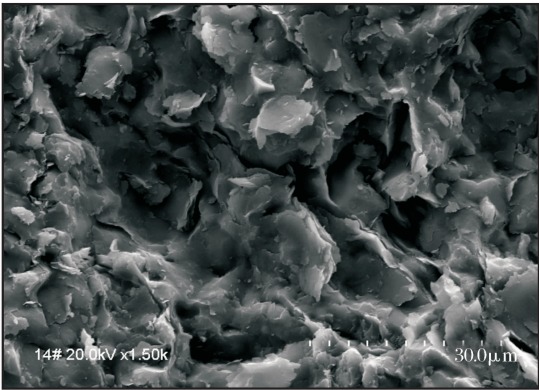


图 7 YB9 井东岳庙段(4 058 m)泥页岩  
粒间次生孔形貌(SEI,×1 500)

表 1 元坝地区扫描电镜分析孔隙、裂缝统计

层位	面孔率/% (区间/平均)	孔径/μm	裂缝规模/μm
大安寨段	(5~12)/10.2	5×10~20×100	5×20~20×100
马鞍山段	(8~12)/10	2×14~30×100	5×130~50×1000
东岳庙段	(5~13)/9.7	2×4~50×100	1×50~20×180

表 2 YB9 井泥页岩矿物成分

序号	深度/m	矿物含量/%				
		粘土	石英	斜长石	方解石	菱铁矿
1	4 037.00	15.81	77.06	3.64	2.39	1.11
2	4 045.00	10.77	47.76		2.49	38.99
3	4 048.00	17.86	79.93			2.21
4	4 058.00	27.67	67.66		2.60	2.07
5	4 085.00	24.84	69.39	3.14	1.29	1.34
6	4 095.00	29.51	65.64	2.24	2.62	
7	4 101.00	26.18	61.68	3.25		8.89
8	4 106.00	21.00	57.21			21.79
9	4 111.00	21.06	74.66	2.39		1.90
10	4 117.50	45.24	52.37	2.39		

利用测井资料计算 YB9 井自流井组东岳庙段一大安寨段泥页岩力学参数,泊松比一般在 0.3 左右,杨氏模量一般大于 30,具低泊松比、高弹性模量特征,有利于页岩气勘探<sup>[10]</sup>。

3.2 页岩气显示

元坝地区自流井组泥页岩中油气显示活跃。统计 24 口井自流井组在泥页岩段显示为 67 层共计厚度为125.05 m,而砂岩和灰岩中油气显示为 59 层共计厚度为118.3 m,泥页岩中油气显示层数更多、厚度更大。元坝地区自流井组 3 口井获工业气流,其天然气显示主要发育于泥页岩或泥页岩与砂岩、灰岩界面,少量发育于砂岩、灰岩中。测试段泥页岩占地层厚度比例分别为 61.30%、60%、31.60%,其次为灰岩、介壳灰岩,细砂岩、粉砂岩含量最少,说明测试段泥页岩中富含天然气。

3.3 天然气特征

3.3.1 天然气组分特征

元坝地区自流井组天然气相对较湿,天然气干燥系数达 0.93,含有少量的丙烷—己烷等轻烃组分,不含硫化氢气体(表 3)。而长兴组天然气为干气,干燥系数大,一般大于 0.999,接近于 1.0,天然气组分中除甲烷、乙烷外,丙烷以上组分含量甚微或者不含,特别是具有高含硫化氢的特征。雷口坡组与须家河组天然气特征接近,干燥系数均介于上述两者之间,也表现出相对较干燥特征,甲烷含量在 95%以上,乙烷以上等重烃含量很低,基本不含戊烷等以上重烃,也不含硫化氢。

3.3.2 天然气碳氢同位素特征

元坝地区陆相自流井组与须家河组天然气的甲烷碳同位素值( $\delta^{13}C_1$ )一般低于-30‰,而长兴组天然气甲烷碳同位素值( $\delta^{13}C_1$ )一般高于-30‰;天然气甲烷氢同位素分析显示,海相长兴组甲烷氢同位

表 3 元坝地区海陆相天然气组分特征

井号	层位	组分含量/%														干燥 系数
		甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	己烷	二氧化碳	氧	氮	氩	氢	硫化氢	
YB102	大安寨段	91.15	5.08	0.93	0.23	0.13	0.09	0.04	0.03	1.59	0.03	0.64	0.03	0	0	0.933 15
		91.46	4.85	0.88	0.2	0.18	0.08	0.03	0.03	1.64	0.02	0.63	0.03	0	0	0.935 94
		91.42	4.85	0.89	0.22	0.16	0.09	0.04	0.03	1.53	0.04	0.7	0.03	0	0	0.935 72
YB9	东岳庙段	9179	5.66	0.48	0.06	0.04	0.007 9	0.004	0.006	0.43	0.04	1.35	0	1.04	0	0.936 18
YB1	须二段	96.6	2.39	0.35	0.04	0.04	0	0	0	0	0	0.58	0	0	0	0.971 64
YB3	须四段	97.95	1.37	0.1	0.01	0.01	0	0	0	0.1		0.02	0.01	0.43	0	0.985 02
YN4	雷口坡组	96.41	0.63	0.05	0	0.01	0	0	0	2.07	0.02	0.78	0.02	0.01	0	0.992 89
YB12	雷口坡组	95.18	1.05	0.08	0.01	0.01	0	0	0	3.3		0.33	0.03	0.01	0	0.988 06
YB1	长兴组	86.23	0.04	0	0	0	0	0	0	6.22	0	0.3	0.01	0.02	7.18	0.999 54
YB11	长兴组	82.16	0.06	0	0	0	0	0	0	11.31	0	0.25	0.01	0.02	6.18	0.999 27

表 4 元坝地区海陆相天然气碳、氢同位素特征

采样井位	层位	深度/m	碳同位素/‰			氢同位素/‰		
			CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	δD <sub>1</sub>	δD <sub>2</sub>	δD <sub>3</sub>
YB101	大安寨段	4 207~4 238	-37	-21.4		-178		
YB9	东岳庙段	4 035~4 110	-38.3	-24.3	-22.3			
YB3	须四段	4 372~4 410	-31.4			-158		
YB2	须三段	4 350~4 380	-30.9	-25.2	-24.4			
YB2	须二段	4 600~4 640	-32	-27	-23.4	-181	-141	-132
YB2	长兴组	6 545~6 593	-29.7	/		-144		
YB12	长兴组	6 692~6 780	-30			-136		

素值高于-150‰,陆相地层甲烷氢同位素值则低于-160‰,特征较明显(表 4)。

YB9 井东岳庙段天然气属于偏干的湿气,相当于高成熟阶段天然气,天然气甲烷、乙烷、丙烷系列碳同位素组成依次变重,且甲烷碳同位素组成相对较轻,反映原地生成而且具有全捕获的特征,也聚集了低演化至目前高成熟阶段的全系列天然气<sup>[11-12]</sup>,具有原地成藏的页岩气地球化学特征。

3.4 页岩气含量

选取自流井组 4 块泥岩样品进行等温吸附分析实验,在温度 30℃ 条件下,逐渐加压至 10.83MPa,吸附量从 0 升至 0.89~1.74 m<sup>3</sup>/t,YB11 井样品等温吸附曲线如图 8 所示,30℃ 时吸附量的饱和压力大约在 12MPa。而该区自流井组地层温度约为 100℃ 左右,随着温度增高,吸附量将显著降低,加拿大 Besa River 组上部黑色页岩层吸附容量随温度变化实验表明,温度从 30℃ 增加到 100℃ 时,吸附气容量成倍降低<sup>[13]</sup>。推测元坝地区自流井组泥页岩吸附气含量在地层状况下小于 1 m<sup>3</sup>/t。

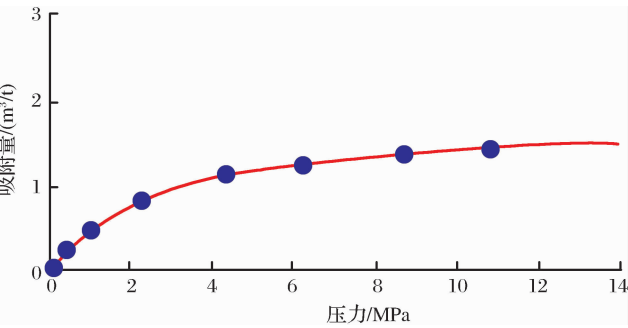


图 8 元坝地区 YB11 井自流井组泥岩样品等温吸附曲线

应用电阻率曲线与声波叠加法定性解释页岩气,通过声波曲线和双侧向电阻率曲线叠合,在伽马曲线约束的范围内,寻找高中子、低密度、高声波、高电阻率的模式识别典型的页岩气层<sup>[14]</sup>,并利用页岩

气测井评价模型进行含气量解释。对元坝地区 2 口井自流井组井段进行初步解释,认为 2 口井自流井组东岳庙段一大安寨段页岩气层均较厚,多呈互层状分布,游离气含量较高,吸附气量较少,总含气量可达 4.2~6.2 m<sup>3</sup>/t,含气饱和度一般为 70%~80%,属于具较高含气性、高游离气的页岩气层。

综上所述,元坝地区自流井组大安寨段—东岳庙段泥页岩具有较大的页岩气勘探潜力,但与国外已知的典型页岩气田(特别是北美地区)相比,元坝地区自流井组埋藏较深、地表复杂、勘探成本高,下一步将重点选择东西两端埋深相对较浅的地区,针对性的开展勘探与压裂改造工艺技术攻关。

4 结论

(1)元坝地区自流井组形成于浅湖—半深湖环境,暗色泥页岩厚度较大,有机碳含量高,有机质热成熟度适中、处于生气高峰期,泥页岩矿物成分中石英含量普遍在 60% 以上,粘土含量在 30% 以下,是页岩气勘探的有利层系。

(2)元坝地区自流井组大安寨段—东岳庙段泥页岩中油气显示活跃,储层物性较好,天然气具有原地生成、聚集的特点,初步评价页岩气层游离气含量较高,属于具较高含气性的页岩气层,已经试获工业气流,具有较大的勘探潜力。

参考文献:

[1] Du min,Chen Shengji,Wan Maoxia,*et al.* Study on distribution and geochemical features of Jurassic source rocks in Sichuan basin[J]. Natural Gas Exploration &. Development, 2005,28(2):15-17. [杜敏,陈盛吉,万茂霞,等. 四川盆地侏罗系源岩分布及地化特征研究[J]. 天然气勘探与开发,2005,28(2):15-17. ]

[2] Chen Shengji, Wan Maoxia, Du Min, *et al.* Jurassic oil-gas source correlation and hydrocarbon source condition in central

- Sichuan region[J]. *Natural Gas Exploration & Development*, 2005, 28(2): 11-14. [陈盛吉, 万茂霞, 杜敏, 等. 川中地区侏罗系油气源对比及烃源条件研究[J]. *天然气勘探与开发*, 2005, 28(2): 11-14.]
- [3] Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(7): 15-18. [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): 15-18.]
- [4] Zhang Linye, Li Zheng, Zhu Rifang. The formation and exploitation of shale gas[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(1): 124-128. [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.]
- [5] Pu Boling, Bao Shujing, Wang Yi, *et al.* Reservoir-forming conditions of shale gas: Taking shale gas basins in North America as examples[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2008, 22(3): 33-39. [蒲泊伶, 包书景, 王毅, 等. 页岩气成藏条件分析——以美国页岩气盆地为例[J]. *石油地质与工程*, 2008, 22(3): 33-39.]
- [6] Zhang Liping, Pan Renfang. Major accumulation factors and storage reconstruction of shale gas reservoir[J]. *China Petroleum Exploration*, 2009, 14(3): 20-23. [张利萍, 潘仁芳. 页岩气的主要成藏要素与气储改造[J]. *中国石油勘探*, 2009, 14(3): 20-23.]
- [7] Chen Gengsheng, Dong Dazhong, Wang Shiqian, *et al.* A preliminary study on accumulation mechanism and enrichment pattern of shale gas[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 17-21. [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.]
- [8] Li Xinjing, Lv Zonggang, Dong Dazhong, *et al.* Geologic controls on accumulation of shale gas in North America[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 27-32. [李新景, 吕宗刚, 董大忠, 等. 北美页岩气资源形成的地质条件[J]. *天然气工业*, 2009, 29(5): 27-32.]
- [9] Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 34(4): 392-400. [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*, 2009, 34(4): 392-400.]
- [10] Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, *et al.* Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(2): 350-356. [王祥, 刘玉华, 张敏, 等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(2): 350-356.]
- [11] Liu Ting, Mi Jinghui, Zhang Min. Carbon isotopic reversal numerical simulation of deep-seated gases, Songliao basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(5): 722-726. [刘婷, 米敬奎, 张敏, 等. 松辽盆地深层天然气碳同位素倒转数值模拟[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(5): 722-726.]
- [12] Yang Chun, Liu Quanyou, Zhou Qinghua, *et al.* Genetic identification of natural gases in Qingshen gas field, Songliao basin[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(5): 792-798. [杨春, 刘全有, 周庆华, 等. 松辽盆地庆深气田天然气成因类型鉴别[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2009, 34(5): 792-798.]
- [13] Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the west Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation[J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(1): 87-125.
- [14] Pan Renfang, Wu Yuan, Song Zheng. Geochemical parameters for shale gas exploration and basic methods for well logging analysis[J]. *China Petroleum Exploration*, 2009, 14(3): 6-9. [潘仁芳, 伍媛, 宋争. 页岩气勘探的地球化学指标及测井分析方法初探[J]. *中国石油勘探*, 2009, 14(3): 6-9.]

## Reservoir-Forming Conditions of Shale Gas in Ziliujing Formation of Yuanba Area in Sichuan Basin

GUO Tong-lou, LI Yu-ping, WEI Zhi-hong

(SINOPEC Exploration Southern Company, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** According to the ideas of exploration and the reservoir accumulation characteristics of shale gas, we have collected shale gas data in Ziliujing Formation from a batch of exploratory wells in Yuanba area of Sichuan basin. And industrial gas flow has been discovered in three wells of the exploratory wells. Research shows that Ziliujing Formation in Yuanba area is formed in shallow lake-semi-deep lake environment. Thick dark shale, high content of organic carbon and moderate thermal maturity of organic matter which is at the peak of gas production are developed in Ziliujing Formation. Moreover, quartz content is generally more than 60% in the mineral composition of shale, while clay content is below 30%. Gas content is high in shale of Ziliujing Formation, which is the basic condition for the formation and exploration of shale gas. And Ziliujing Formation is the favorable strata for the shale gas exploration.

**Key words:** Shale gas; Ziliujing Formation; Reservoir accumulation; Yuanba area; Sichuan basin.