

引用格式:张光荣,聂海宽,唐玄,等.基于地层水指标的页岩气保存条件评价[J].油气藏评价与开发,2021,11(1):47-55.

Zhang Guangrong, Nie Haikuan, Tang Xuan, et al. Evaluation of shale gas preservation conditions based on formation water index: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 47-55.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.01.007

## 基于地层水指标的页岩气保存条件评价

——以渝东南地区五峰组—龙马溪组页岩气藏为例

张光荣<sup>1,2</sup>,聂海宽<sup>3,4</sup>,唐玄<sup>1,2</sup>,张培先<sup>5</sup>,彭勇民<sup>3,4</sup>

(1.中国地质大学(北京),北京100083;2.自然资源部页岩气资源战略评价重点实验室,北京100083;

3.页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,北京100083;4.中国石化石油勘探开发研究院,北京100083;

5.中国石化华东油气分公司勘探开发研究院,江苏南京210011)

**摘要:**四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组页岩气勘探开发已取得较好成果,但不同井位之间页岩气含量差异大。通过对渝东南地区PY1HF、JY1HF、NY1HF、LY1等井位地层水的矿化度、地化指标、水型等分析后认为:CaCl<sub>2</sub>水型反映较好的页岩气保存条件,NaHCO<sub>3</sub>和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>水型反映地层水与大气水有不同程度的贯通,保存条件相对较差。基于渝东南地区发育的大型断裂和残留向斜构造及五峰组—龙马溪组地层水特征,将其地下水渗流方式对应划分为大型断裂发育区地层水下渗型和残留向斜区地层水向心流型两种类型,分别对应不同的页岩气保存条件。大型断裂发育的地区,地表水沿断裂下渗深度较大,对页岩气藏破坏较大,多表现为微含气或不含气状态;残留向斜区地层水向心流型,向斜深部保存条件相对较好。在向斜边缘地表水与地层水形成自由交替带,页岩气藏的保存条件较差,因而含气性较差,而越靠近核部地区受大气水下渗影响越弱,保存条件越好。

**关键词:**渝东南;地层水;页岩气;保存条件;矿化度;化学指标

中图分类号:TE37

文献标识码:A

### Evaluation of shale gas preservation conditions based on formation water index: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing

Zhang Guangrong<sup>1,2</sup>, Nie Haikuan<sup>3,4</sup>, Tang Xuan<sup>1,2</sup>, Zhang Peixian<sup>5</sup>, Peng Yongmin<sup>3,4</sup>

(1.China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Strategy Evaluation for Shale Gas, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100083, China; 3.Shale Oil and Gas Enrichment Mechanism and Effective Development of State Key Laboratory, Beijing 100083, China; 4.Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China; 5.Research Institute of Exploration & Development, Sinopec East China Oil and Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210011, China)

**Abstract:** Significant progress has been made in the exploration and development of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formation of Sichuan Basin, but shale gas content varies greatly among different well locations. Through the analysis of formation water salinity, geochemical index and formation water type in Well-PY1HF, Well-JY1HF, Well-NY1HF, Well-LY1 and other wells in Southeastern Chongqing, it is found that CaCl<sub>2</sub> water type reflects good shale gas preservation conditions, while the water types of NaHCO<sub>3</sub> and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> reflect formation water and atmospheric water are interconnected to different extent, leading to a relatively poor preservation condition. Based on the characteristics of large-scale faults and residual syncline structures developing in Southeastern Chongqing and the formation water characteristics of Wufeng-Longmaxi Formation, the groundwater seepage mode

收稿日期:2020-06-28。

第一作者:张光荣(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事非常规油气地质研究。地址:北京市海淀区学院路29号,邮政编码:100083。  
E-mail:2106180043@cugb.edu.cn

通讯作者:聂海宽(1982—),男,博士,研究员,主要从事非常规油气地质研究。地址:北京市海淀区学院路31号,邮政编码:100083。  
E-mail:niehk.syky@sinopec.com

基金项目:国家自然科学基金“四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气储层演化机理及评价方法”(41872124);国家自然科学基金“四川盆地及周缘龙潭组海陆过渡相页岩复杂有机质孔隙发育机制”(41972132);国家自然科学基金“中国南方寒武系页岩有机质、流体和孔隙演化耦合机制研究”(41730421)。

can be divided into two types: the infiltration type in the large-scale fault development area and the centripetal flow type in the residual syncline area, corresponding to different shale gas preservation conditions. In the area with large-scale faults, the surface water infiltrates deeply along the faults, causing great damage to shale gas reservoir, most of them contain few gases. The formation water in the residual syncline is centripetal flow, and the deep part of the syncline is relatively well preserved. The surface water and the formation water form a free alternating zone at the syncline edge, and the preservation condition of shale gas reservoir is poor, thus the gas bearing property is poor. In the core part of the syncline, the closer to the core part, the weaker the influence of atmospheric water infiltration is, and the better the preservation condition will be.

**Key words:** Southeastern Chongqing, formation water, shale gas, preservation condition, salinity, chemical index

四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组是目前勘探、开发的重点层系<sup>[1]</sup>,已经建成威远—威荣、长宁—昭通—太阳、涪陵等页岩气田<sup>[1-2]</sup>。在页岩沉积环境、有机碳含量、热演化程度、脆性矿物含量、厚度、埋深基本类似的情况下,盆地内外页岩含气量、页岩气井的产量差异较大<sup>[6]</sup>,表明盆地内外页岩气保存条件不同<sup>[7]</sup>。页岩气保存条件的影响因素主要包括构造作用、演化历史、地层水条件、盖层及其微观性质等<sup>[8]</sup>,地层水特征能够指示盆地流体系统的开放性和封闭性<sup>[9]</sup>。保存较好的页岩地层水水型以CaCl<sub>2</sub>和NaCl型为主,以NaHCO<sub>3</sub>和Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>型为主的地层水与大气水相贯通,保存条件相对差<sup>[10]</sup>。四川盆地中目前已经建成的焦石坝、长宁—威远、昭通页岩气田以及丁山地区,产量较好的井位水型大多以CaCl<sub>2</sub>和NaCl型为主<sup>[10]</sup>。地层水化学指标可以间接反映地层的封闭性<sup>[11]</sup>,变质系数可以定量判断地层的封闭性,系数越小反映地层封闭性越好;钠氯系数反映地层水变质程度和活性,系数越小地层的封闭性越好;钙镁系数反映地下卤水变质程度,系数越大,变质程度越高,封闭性也就越好;脱硫系数是地层水氧化还原环境的重要指标,系数越小反映地层的封闭性越好;碳酸盐平衡系数可以定量反映油气性质和运移方向。

以四川盆地焦石坝、武隆和彭水等地区部分页岩气井为例,采集研究区8口井五峰组—龙马溪组的地层水数据。对盆地中地层水矿化度、水型、化学指标、断裂活动对地层水的影响、古大气水下渗深度、区域水动力条件影响等因素综合分析,探索、研究相关影响因素对页岩气保存条件的影响。

## 1 地质概况

渝东南地区位于重庆市东南部与湖北省西南部以及湖南省西北部,属于四川盆地东南部。构造上属于扬子准地台内坳陷构造单元,位于齐岳山断裂中南段,由一系列复背斜和复向斜构成<sup>[12]</sup>。中上扬子板块经过加里东期、海西期、印支期等一系列构造运

动叠加改造后<sup>[13]</sup>,缺失泥盆系、石炭系,且三叠系遭受不同程度的剥蚀,导致渝东南地区不同构造部位保存条件不同<sup>[14]</sup>。上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组富有机质、富含笔石的黑色泥页岩,具有岩性致密、埋藏深度不均、有机质含量较高、厚度较大的特点<sup>[15]</sup>。本次研究所用样品来自渝东南地区五峰组—龙马溪组部分页岩气井(图1)。

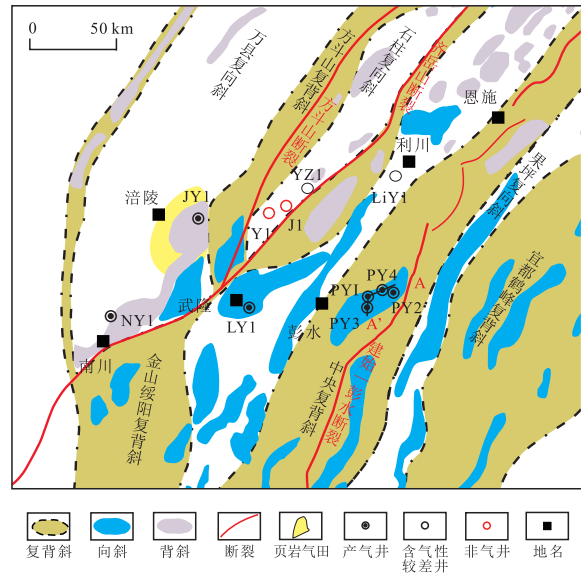


图1 渝东南五峰组—龙马溪组主要页岩气田和页岩气井  
(根据参考文献[16]修改)

Fig. 1 Major gas fields and typical shale gas wells in Wufeng-Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing  
(According to reference [16])

## 2 地层水化学特征

地层水化学场特征一定程度上反映地下水流系统的演化和水文地质条件<sup>[17]</sup>,不同水型反映不同演化历史和保存条件。本次研究采集PY1HF、PY2HF、PY3HF、PY4HF、LY1、NY1HF、JY1HF、JY1-3HF井五峰组—龙马溪组(WF2-LM4)<sup>[18]</sup>地层水数据,水型和采样时间不同,样品深度分布在2 136~4 500 m(表1)。以返排时间长、离子含量相对稳定的地层水

表1 渝东南五峰组—龙马溪组部分井位采样数据  
Table 1 Sampling data of some wells in Wufeng-Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing

井位	深度(m)	采样时间(d)
PY1HF	2 136~2 159	47~1 245
PY2HF	2 233~2 260	4~157
PY3HF	2 753~2 780	192~1 005
PY4HF	1 899~1 915	10~269
LY1	2 818~2 824	124~133
NY1HF	4 399~4 406	165~497
JY1HF	2 408~2 419	96~218
JY1-3HF	2 409~2 417	0~45

为主进行讨论,水型、矿化度等指标具有可比性。

正常地层水矿化度在1 g/L左右,PY2HF井线性胶以及滑溜水混合液矿化度略大(表2),表明线性胶和滑溜水混合液会影响地层水离子浓度和矿化度;JY1HF井矿化度与之前的研究差别较大,综合返排时间和压裂液因素,认为其不反映原始地层水真实情况;而LY1井、JY1-3HF井的采样时间集中且返排时间较短,只作为对照组。

表2 PY2HF井压裂液对矿化度影响  
Table 2 Effect of fracturing fluid on salinity of Well-PY2HF (g/L)

PY2HF井压裂液	K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	总矿化度
滑溜水+线性胶混合液	0.482	0.107		0.171	0.290	0.403	1.40
线性胶	0.571	0.070		0.231	0.216	1.394	2.40
滑溜水	1.511	0.097		2.246	0.260	0.279	4.30
PY2HF井	8.546	0.392	0.048	15.095	0.040	0.549	24.64

表3 渝东南五峰组—龙马溪组地层水离子含量统计  
Table 3 Ion content of Wufeng-Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing

井位	离子含量(g/L)						总矿化度(g/L)	埋深(m)	
	K <sup>+</sup> +Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>			
PY1HF	范围值	10.884~22.510	0.585~1.053	0.046~0.157	17.219~36.470	0.041~0.566	0.186~0.623	29.8~54.6	2 136~2 159
	平均值	14.851	0.776	0.076	27.705	0.234	0.376	43.98	
PY2HF	范围值	4.674~12.992	0.310~0.613	0.032~0.054	9.359~25.294	0.005~0.070	0.310~0.650	15.0~39.2	2 233~2 260
	平均值	8.546	0.392	0.048	15.095	0.040	0.549	24.64	
PY3HF	范围值	13.120~21.380	0.078~0.991	0.012~0.117	24.066~39.298	0.032~0.165	0.310~0.652	38.0~59.3	2 753~2 780
	平均值	16.085	0.830	0.072	31.102	0.104	0.376	48.58	
PY4HF	范围值	4.989~13.273	0.299~0.761	0.005~0.095	8.895~27.881	0.036~0.114	0.124~0.898	15.1~42.1	1 899~1 915
	平均值	11.354	0.600	0.071	23.928	0.068	0.289	36.28	
LY1	范围值	11.516~11.770	0.245~0.269	0.038~0.105	11.174~11.528	8.991~9.117	0.888~0.941	32.9~33.5	2 818~2 824
	平均值	11.618	0.257	0.065	11.344	9.052	0.900	33.25	
NY1HF	范围值	7.759~10.819	0.147~1.634	0.004~0.029	13.423~25.295	0.004~0.138	0.279~1.582	23.5~38.3	4 399~4 406
	平均值	9.160	0.327	0.017	17.050	0.051	0.647	27.26	
JY1HF	范围值	1.384~14.200	0.049~0.373	0.022~0.081	1.926~21.509	0.021~0.360	1.448~1.550	4.1~37.9	2 408~2 419
	平均值	6.515	0.174	0.043	9.542	0.229	1.316	17.75	
JY1-3HF	范围值	1.372~5.877	0.162~0.249	0.095~0.113	1.385~8.666	0.123~0.823	1.491~1.538	5.4~16.4	2 409~2 417
	平均值	3.625	0.205	0.104	5.026	0.473	1.514	10.90	

## 2.1 主要离子组成

地层水的离子组成和浓度受水动力特征和水文地球化学环境控制,能反映页岩气保存条件的优劣<sup>[11]</sup>。此次地层水样品中,主要阴离子有Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>,主要阳离子有K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>。K<sup>+</sup>+Na<sup>+</sup>的平均值为10.219 g/L, Ca<sup>2+</sup>平均值为0.445 g/L, Mg<sup>2+</sup>平均值为0.062 g/L, Cl<sup>-</sup>平均值为17.599 g/L。不同井位地层水性质存在差异,离子含量差别较大,具体特征见表3。

阳离子中Na<sup>+</sup>和K<sup>+</sup>占绝对优势,阴离子中Cl<sup>-</sup>占绝对优势,次要离子是HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>。不同离子的比值可以反映地层水所处的水文地球化学环境和水-岩相互作用强度<sup>[19]</sup>,主要包括以下几个指标(表4):①变质系数[(rCl<sup>-</sup>-rNa<sup>+</sup>)/rMg<sup>2+</sup>, r为离子浓度]:埋藏深度越大、封闭性越好,变质系数就越大。NY1HF井变质系数平均值493.2, PY3HF井变质系数平均值315.75, PY4HF井变质系数平均值279.33, PY1HF井变质系数平均值204.76, PY2HF井变质系数平均值141.42; JY1HF井变质系数平均值206.54, JY1-3HF井变质系数平均值51.67;②钠氯系数(rNa<sup>+</sup>/rCl<sup>-</sup>):可以判断地层水的来源、浓缩变质作用程度及水动力条件等<sup>[11]</sup>。地层水中Na<sup>+</sup>较易参与化学反应降低浓度,Cl<sup>-</sup>含量变化不大,因此埋藏过程中该系数趋于降低,若系数变大则反映受外部水影响,不利于油气保存。标准海水的钠氯系数平均值为0.85,受外部水影响的系数会大于1。PY4HF井钠氯系数平均值为0.47, PY3HF井、NY1HF井钠氯系数平均值为0.51, PY1HF井钠氯系数平均值0.54, PY2HF井钠氯系数平均值

0.56; LY1井平均值1.024, JY1HF井钠氯系数平均值0.59; ③钙镁系数( $rCa^{2+}/rMg^{2+}$ ):反映地下卤水变质程度,封闭时间越长,封闭性越好,地层水变质程度就越高,钙镁系数越大。其分界线是3,深层卤水的系数一般都大于3。NY1HF井平均值19.83, PY4HF井平均值14.26, PY3HF井平均值13.21, PY1HF井钙镁系数平均值11.63, PY2HF井平均值8.33, LY1井平均值为4.35, JY1HF井平均值4.46, JY1-3HF井平均值1.95; ④脱硫系数 $[rSO_4^{2-} \times 100 / (rCl^- + rSO_4^{2-})]$ :地层封闭越好,外界供给 $SO_4^{2-}$ 越少且剩余 $SO_4^{2-}$ 被还原程度越高,脱硫系数就越小。PY2HF井脱硫系数平均值0.26, PY4HF井脱硫系数平均值0.32, PY3HF井脱硫系数平均值0.33, NY1HF井平均值0.39, PY1HF井脱硫系数平均值1.17, LY1井平均值79.81, JY1HF井平均值6.29, JY1-3HF井平均值19.34; ⑤碳酸盐平衡系数 $[(rHCO_3^- + rCO_3^{2-})/rCa^{2+}]$ :反映油气性质和运移方向,地层封闭性越好且离油气藏越近,油气比重就越小,碳酸盐平衡系数就越小。PY1HF井碳酸盐平衡系数平均值0.56, PY2HF井碳酸盐平衡系数平均值1.52, NY1HF井碳酸盐平衡系数平均值2.60, LY1井平均值3.51, JY1-3HF井碳酸盐平衡系数平均值7.7, JY1HF井平均值10.47。

单个化学指标具有不确定性,需综合几种化学指标判断。表4数据显示, NY1HF井地层水化学指标最好,其页岩气保存条件相对也最好; PY1HF井、PY2HF井、PY3HF井次之,但总体均反映较好的页岩气保存条件; PY4HF井相对略差。LY1井、JY1HF井、JY1-3HF井只做参考。通过相关系数综合分析得出的结论,与现场认识存在一定的差异,分析认为

可能受其余因素影响,如LY1井采样时间较短,相应化学指标可能受到一定的影响。

## 2.2 地层水矿化度和水型

### 2.2.1 矿化度

地层水矿化度是地质环境变迁所导致的地下水动力场和水化学场复杂演化的反映<sup>[1]</sup>,水体离子含量不同导致地层水矿化度的不同。研究区地层水的总矿化度(表2、表3)主要为1.4~59.3 g/L, PY1HF井地层水矿化度相对较高,返排456~995 d,矿化度就维持在48 g/L以上,且大多都大于50 g/L。PY2HF井地层水返排4~157 d,矿化度15~39.2 g/L,平均24.64 g/L。PY3HF井地层水返排192~1 005 d,矿化度38~59.3 g/L,平均48.58 g/L。PY4HF井地层水返排10~269 d,矿化度15.1~42.1 g/L,平均36.28 g/L。NY1HF井地层水返排165~543 d,地层水矿化度就稳定分布在23.5~38.3 g/L,平均27.26 g/L。LY1井地层水在返排124~133 d,矿化度在33.4 g/L左右。JY1HF井地层水返排111~137 d,矿化度4.1~6.6 g/L,返排201 d之后,矿化度就在22.4~37.9 g/L。JY1-3HF井投产到返排45 d,矿化度5.4~16.4 g/L,平均10.9 g/L。根据数据显示, PY3HF井和PY1HF井地层水矿化度最高,保存条件相对较好。而LY1井、JY1HF井和JY1-3HF井可能是返排率较低以及返排时间略短,导致地层水矿化度较低,只具有一定的参考性。

地层水矿化度可以反映储层封闭条件的好坏<sup>[1]</sup>, 本区地层水主要离子浓度与总矿化度具有较好的正相关性,  $Na^+$ 、 $K^+$ 与总矿化度相关系数0.941 9,  $Cl^-$ 与总矿化度相关系数0.869 1,  $Ca^{2+}$ 与总矿化度相关系数

表4 渝东南地区典型井地化指标

Table 4 Geochemical index of typical wells in Southeastern Chongqing

井号	变质系数	钠氯系数	钙镁系数	脱硫系数	碳酸盐平衡系数	水型	埋深(m)
PY1HF	范围值	54.04~411.72	0.41~0.72	6.24~17.19	0.11~3.29	CaCl <sub>2</sub>	2 136~2 159
	平均值	204.76	0.54	11.63	1.17		
PY2HF	范围值	65.95~238.04	0.48~0.70	6.60~12.90	0.03~0.42	CaCl <sub>2</sub>	2 233~2 260
	平均值	141.42	0.56	8.33	0.26		
PY3HF	范围值	84.43~961.09	0.45~0.68	6.60~32.50	0.13~0.45	CaCl <sub>2</sub>	2 753~2 780
	平均值	315.75	0.51	13.21	0.33		
PY4HF	范围值	146.87~1 209.20	0.46~0.54	6.10~65.04	0.16~1.27	CaCl <sub>2</sub>	1 899~1 915
	平均值	279.33	0.47	14.26	0.32		
LY1	范围值		1.02~1.03	2.38~6.85	77.99~81.36	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2 818~2 824
	平均值		1.024	4.35	79.81		
NY1HF	范围值	267.47~856.79	0.40~0.69	9.74~67.98	0.03~1.06	CaCl <sub>2</sub>	4 399~4 406
	平均值	493.20	0.51	19.83	0.39		
JY1HF	范围值	6.04~712.45	0.02~0.90	1.98~12.37	1.07~14.40	CaCl <sub>2</sub>	2 408~2 419
	平均值	206.54	0.59	4.46	6.29		
JY1-3HF	范围值	12.23~91.12		1.70~2.20	1.40~37.28	NaHCO <sub>3</sub>	2 409~2 417
	平均值	51.67		1.95	19.34		

0.663,  $Mg^{2+}$ 与总矿化度相关系数0.272 9(图2)。

### 2.2.2 水型

$CaCl_2$ 型地层水为深盆滞留水,分布在区域水动力相对阻滞区,地层水经受上覆地层的压实作用形成离心流泄水,发生强烈浓缩作用和脱硫作用,使 $SO_4^{2-}$ 离子含量急剧减少,而 $Cl^-$ 和 $Ca^{2+}$ 离子相对富集,反映了储层封闭条件良好,对页岩气藏形成和保存十分有利<sup>[17,20]</sup>。数据显示PY1HF井、PY2HF井、PY3HF井、PY4HF井、NY1HF井和JY1HF井的水型以 $CaCl_2$ 型为主, $Na_2SO_4$ 水型和 $NaHCO_3$ 水型为辅,而LY1井水型以 $Na_2SO_4$ 水型为主(表4)。

## 3 地层水对页岩气保存条件的影响

大气水下渗大多会破坏页岩气藏,下渗深度不同,对页岩气藏的影响程度不同。根据大气水的下渗深度划分为三个区带:强大气水下渗带、弱大气水下渗带和地层水滞留带,分别对应自由交替带、交替阻滞带、交替停滞带<sup>[21]</sup>。强大气水下渗带页岩气的保存条件最差,地层水滞留带对页岩气的保存最为有

利,弱大气水下渗带介于强大气水下渗带和地层水滞留带之间。根据之前对鄂西渝东地区地层水进行的研究<sup>[12, 22]</sup>及大气水下渗带的水化学特征,结合各个井位地层水离子含量变化进行综合判断,PY2HF井、LY1井、PY4HF井、PY1HF井和PY3HF井地层水属于地层水交替阻滞带,而JY1-3HF井、JY1HF井和NY1井地层水属于地层水停滞带,对于页岩气保存都较为有利。

### 3.1 大气水下渗影响

古大气水下渗一般对页岩气藏破坏较小,但是古大气水下渗后,地层经历再沉积、再生烃、新的盖层进行分割,大气水下渗的影响程度就需进行新的界定。楼章华、马永生等<sup>[22-23]</sup>研究了川东—鄂西地区燕山—喜马拉雅期抬升剥蚀和断裂作用过程中古大气水下渗的基本特点:鄂西—渝东为1 500~2 200 m(图3)。总体上由西向东古大气水下渗深度增加,古大气水下渗深度变化说明地层抬升幅度不均一、断裂发育强度差别较大,导致页岩气保存条件存在差异性。

根据古大气水下渗深度分布(图3)可以看出,焦

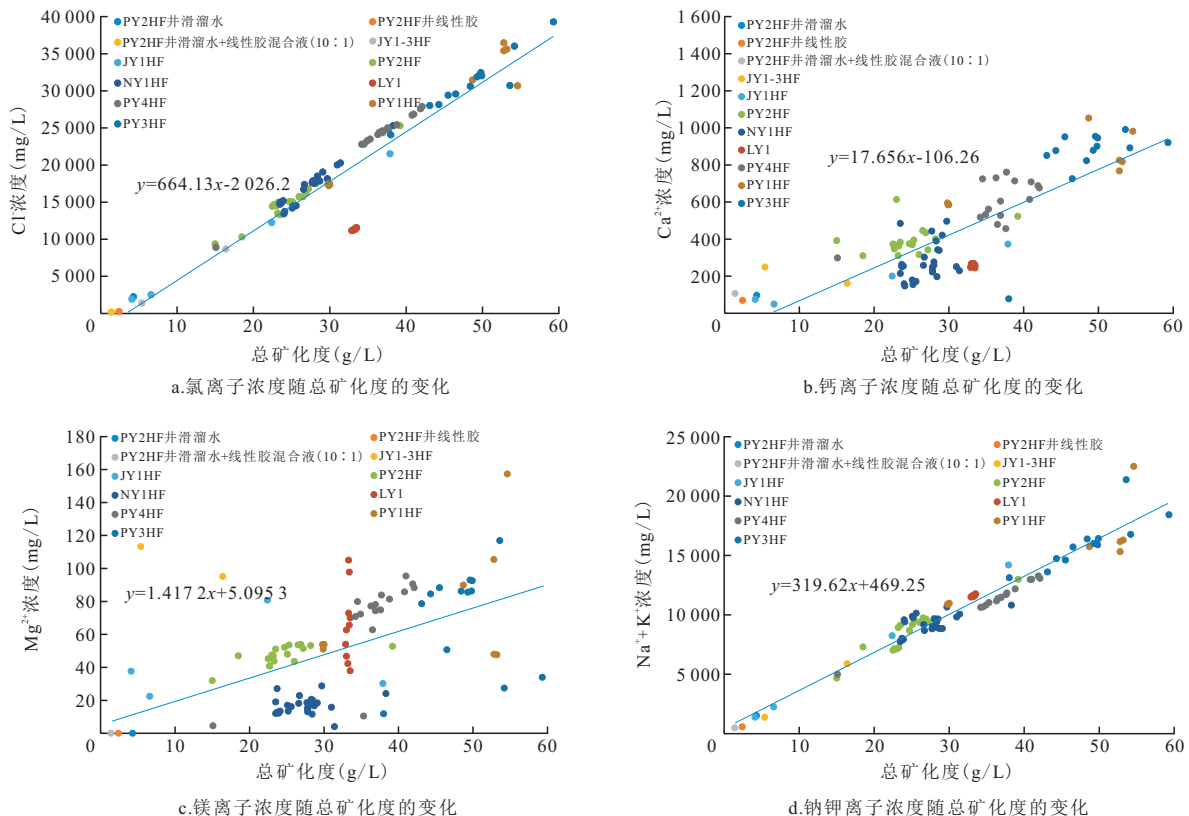


图2 渝东南五峰组—龙马溪组地层水主要离子浓度随总矿化度的变化

Fig. 2 Variation of main ion's concentration with total salinity of Wufeng-Longmaxi Formation in Southeastern Chongqing

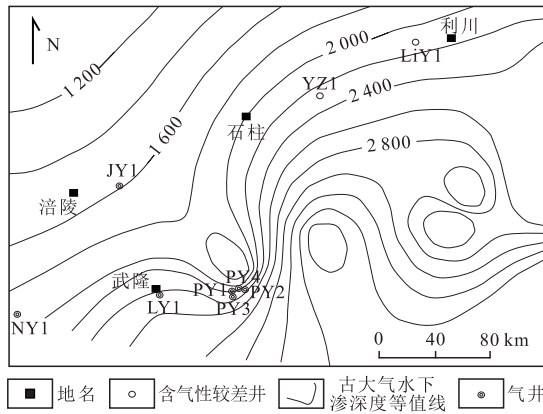


图3 鄂西—渝东地区古大气水下渗平均深度平面分布  
(根据参考文献[23]修改)

Fig. 3 Plane distribution of average depth of paleoatmospheric water infiltration in Western Hubei-Eastern Chongqing (Modified according to reference [23])

石坝地区古大气水下渗深度在1 600 m左右,产层埋深2 410 m左右<sup>[24]</sup>,JY1HF井测试日产气量达 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ <sup>[25]</sup>,可以得知大气水下渗尚未影响到JY1HF井;NY1HF井古大气水下渗深度在1 900 m左右,产层埋深约4 500 m,具有较好的页岩气保存条件;PY1HF井古大气水下渗深度在2 200 m左右,产层埋深在2 260 m左右,地层水平均矿化度43.98 g/L,测试日产气量达 $2.52 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;LY1井古大气水下渗深度在2 400 m左右,产层埋深约2 805 m,测试日产气量为 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。通过对比PY1井和LY1井测试气产量以及总产气量,LY1井总产气量高于PY1井。但是上述地下水化学指标中PY1井优于LY1井,可能是存在其他因素的影响。排除大多数因素的影响,从地层水角度来看,古大气水下渗至页岩气藏埋深相近深度时,就开始对页岩气藏造成破坏。表明古大气水下渗深度越深,页岩气藏的保存条件越差。

### 3.2 地层水活动类型对页岩气保存条件的影响

针对研究区存在的断裂、残留向斜构造和地层水特征,将其中地层水划分为大型断裂发育区地层水下渗型和残留向斜区地层水向心流型两种类型。两种构造类型明显,大型断裂区距离气藏较近时,会对页岩气藏造成破坏;而残留向斜构造却可能具有一定的保存条件。大型断裂发育区地层水下渗型页岩气藏保存条件可能较差,地表水沿断裂下渗深度较大,破坏页岩气藏的保存,多表现为微含气或不含气状态;残留向斜区地层水向心流型的地层水为向

心流,向斜边缘部位,地表水与地层水形成自由交替带,页岩气藏遭到一定程度的破坏,页岩含气性相对较差;越靠近核部地区,受大气水下渗影响越弱,保存条件越好。

#### 3.2.1 大型断裂发育区地层水下渗型

区域构造会对地层水的保存产生影响,不同的断层对页岩气的保存产生不同的影响。新断层在形成期和活动期属于开启状态,对页岩气的保存产生不利影响;而稳定期的断层状态不同,可能会形成封闭断层,有利于地层水滞留和页岩气的保存<sup>[26]</sup>。鄂西渝东地区构造稳定于燕山期,马永生等<sup>[23]</sup>对燕山期构造活动研究发现:南方海相页岩遭受断裂破坏较多,导致其中油气藏散失,多是油气沿断裂散失。其中,鄂西—渝东地区与建始—彭水、齐岳山和方斗山等大型断裂接壤的地区,属于构造活动区,地层受构造作用影响较强,形成导水的开放性断裂,破坏页岩气的保存<sup>[27]</sup>,如YZ1井、LiY1井等,页岩气藏受构造作用影响强烈,页岩含气量较低甚至不含气。通过测试出的地层水指标显示,区域大断裂形成的地层水自由交替带对页岩气藏造成破坏更大,例如YZ1井所邻近的齐岳山断裂附近的盐井、卷店构造的Y1井和J1井,水文开启程度略大,深大断裂的发育以及二叠系、三叠系地层的出露,导致二叠系长兴组、三叠系飞仙关组和嘉陵江组矿化度极低的地层水甚至淡水<sup>[28]</sup>,Y1井飞三段以上为自由交替带,矿化度小于3 g/L,水型为 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 型,对其下方五峰组—龙马溪组页岩气藏的保存造成破坏。YZ1井北部的建南构造,其埋藏深度较大,且三叠系的水型多为 $\text{CaCl}_2$ 型,反映区域盖层未遭受破坏,页岩气保存条件较好(图4)。

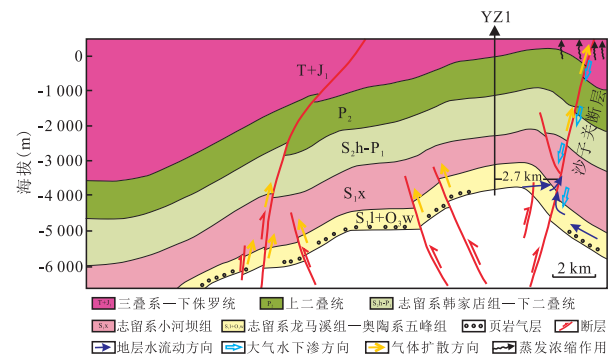


图4 大型断裂发育导致地层水活动破坏页岩气的保存  
Fig. 4 Damage caused by formation water activities to shale gas preservation due to large-scale faults development

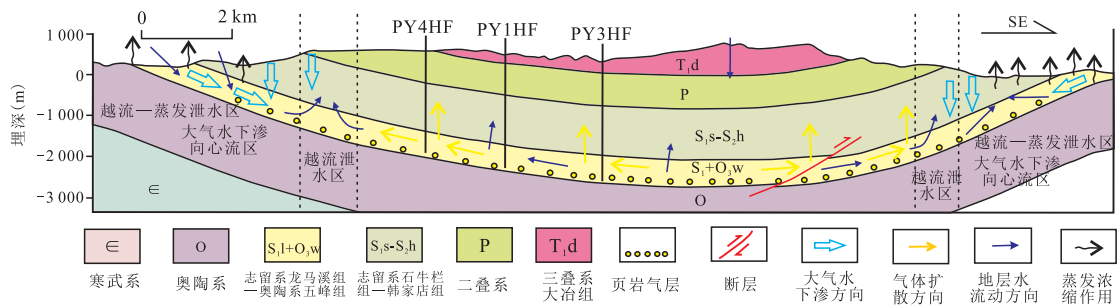


图5 残留向斜中心流式地层水和页岩气藏

Fig. 5 Formation water of centripetal flow type and shale gas reservoir in residual syncline

### 3.2.2 残留向斜区地层水向心流型

区域隆起后,地层遭受剥蚀,形成残留向斜构造,鄂西—渝东地区的桑柘坪向斜、武隆向斜和白马向斜均属于残留向斜<sup>[29]</sup>,页岩气保存其中形成残留向斜型常压页岩气藏<sup>[30]</sup>。这种页岩气藏形成后,大气水沿页岩层理下渗形成向心流,大气水下渗向心流在残留向斜边部形成大气水下渗向心流区,下渗的地层水会导致地层含水量过多,只有通过泄水才能保持物质平衡,形成越流—蒸发泄水区,对残留向斜边部页岩气藏造成破坏,地层含气量大大降低。随埋深增加,大气水下渗与地层水流动形成稳定状态,进而形成越流泄水区,这种稳定状态能够在一定程度上形成压力封闭,类似于深盆气水倒置的富集模式<sup>[31]</sup>,从残留向斜翼部到向斜核部地区,大气水下渗向心流由自由交替带逐渐过渡到阻滞带,大气水下渗影响逐渐减弱,此时页岩气富集程度主要受控于向心流的强度和沿上倾方向页岩气散失率(主要受控于页岩水平渗透率)。根据统计出的数据显示, PY1HF、PY2HF 和 PY3HF 井都为 CaCl<sub>2</sub> 水型,结合古大气水下渗深度判断, PY4HF 井、PY1HF 井和 PY3HF 井地层水属于地层水阻滞带(表3、图5)。各种化学指标也都显示从向斜翼部的 PY4HF 井到向斜核部的 PY3HF 井封闭性逐渐变好,页岩气保存条件逐步变好,其压裂测试产气量从(1.0~1.2)×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d (PY4HF 井)到 2.52×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d (PY1HF 井),再到 3.2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d (PY3HF 井)逐渐增高。

## 4 结论

1) 通过对水型、化学指标、矿化度等进行研究,认为渝东南地区五峰组—龙马溪组页岩地层水矿化

度较高、含气保存条件较好,不与外界相互接触的地层水水型以 CaCl<sub>2</sub> 水型为主,而 NaHCO<sub>3</sub> 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 型地层水与大气水有不同程度的贯通,造成含气保存条件较差。

2) 基于渝东南地区发育的大型断裂和残留向斜构造,结合五峰组—龙马溪组地层水特征,将其划分为大型断裂发育区地层水下渗型和残留向斜区地层水向心流型两种类型。大型断裂发育区,地表水沿断裂下渗对页岩气藏造成破坏,多表现为微含气或不含气状态;残留向斜区地层水为向心流,在向斜边缘地表水与地层水形成自由交替带,页岩气藏的保存条件较差,含气性较差,越靠近核部地区受大气水下渗影响越弱,保存条件越好。

3) 根据渝东南地区多口井的地化指标综合分析认为: NY1HF 井的地层水地化指标相对较好, PY1HF 井、PY2HF 井和 PY3HF 井略差,但总体均反映较好的页岩气保存条件; PY4HF 井保存条件相比 NY1HF 井、PY1HF、PY2HF 和 PY3HF 略差。此外,由于返排时间段、返排率低等因素的影响, JY1HF 井、JY1-3HF 井和 LY1 井地层水化学指标参考意义较差。

### 参考文献

- [1] Nie H K, He Z L, Wang R Y, et al. Temperature and origin of fluid inclusions in shale veins of Wufeng-Longmaxi Formations, Sichuan Basin, south China: Implications for shale gas preservation and enrichment[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 193.
- [2] Li Y Z. Mechanics and fracturing techniques of deep shale from the Sichuan Basin, SW China[J]. Energy Geoscience, 2021, 2 (1): 1-9.
- [3] 马新华, 谢军. 川南地区页岩气勘探开发进展及发展前景[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 161-169.  
Ma Xinhua, Xie Jun. The progress and prospects of shale gas exploration and exploitation in southern Sichuan Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45

- (1): 161-169.
- [4] Zhao Z H, Wu K D, Fan Y, et al. An optimization model for conductivity of hydraulic fracture networks in the Longmaxi shale, Sichuan basin, Southwest China[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(1-2): 47-54.
- [5] Morozov V P, Jin Z J, Liang X P, et al. Comparison of source rocks from the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Yangzi Platform and the Upper Devonian Semiluksk Formation in East European Platform[J]. *Energy Geoscience*, 2021, 2(1): 63-72.
- [6] 郭彤楼,张汉荣.四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 28-36.  
Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 28-36.
- [7] 聂海宽,包书景,高波,等.四川盆地及其周缘下古生界页岩气保存条件研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(3): 280-294.  
Nie Haikuan, Bao Shujing, Gao Bo, et al. A study of shale gas preservation conditions for the Lower Paleozoic in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(3): 280-294.
- [8] Hao F, Zou H Y, Lu Y C. Mechanisms of shale gas storage: Implications for shale gas exploration in China[J]. *AAPG Bulletin*, 2013, 97(8): 1325-1346.
- [9] 梁晓伟,牛小兵,李卫成,等.鄂尔多斯盆地油田水化学特征及地质意义[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(5): 502-508.  
Liang Xiaowei, Niu Xiaobing, Li Weicheng, et al. Chemical character of oil-field water in Ordos Basin and geological significance[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2012, 39(5): 502-508.
- [10] 何顺,秦启荣,范存辉,等.川东南丁山地区页岩气保存条件分析[J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(2): 24-31.  
He Shun, Qin Qirong, Fan Cunhui, et al. Shale gas preservation conditions in Dingshan area, Southeastern Sichuan[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(2): 24-31.
- [11] 杨冬,虞兵,唐浩,等.大宛齐油田地层水化学特征与油气保存条件分析[J]. *石油地质与工程*, 2013, 27(4): 27-30.  
Yang Dong, Yu Bing, Tang Hao, et al. Chemical characteristics of formation water and analysis of oil and gas preservation conditions in Dawanqi Oilfield[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2013, 27(4): 27-30.
- [12] 黎琼,欧光习,汪生秀,等.渝东南地区五峰组—龙马溪组页岩气储层流体地球化学特征——以西参2井为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(5): 529-540.  
Li Qiong, Ou Guangxi, Wang Shengxiu, et al. Geochemical characteristics of fluid from shale gas reservoir of Wufeng-Longmaxi Formations in the Southeastern Chongqing, China—A case study of Well YC2[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(5): 529-540.
- [13] 何希鹏,高玉巧,唐显春,等.渝东南地区常压页岩气富集主控因素分析[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(4): 654-664.  
He Xipeng, Gao Yuqiao, Tang Xianchun, et al. Analysis of major factors controlling the accumulation in normal pressure shale gas in the southeast of Chongqing[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(4): 654-664.
- [14] He X P, Zhang P X, He G S, et al. Evaluation of sweet spots and horizontal-well-design technology for shale gas in the basin-margin transition zone of southeastern Chongqing, SW China[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(3-4): 134-146.
- [15] 聂海宽,张柏桥,刘光祥,等.四川盆地五峰组—龙马溪组页岩气高产地质原因及启示——以涪陵页岩气田JY6-2HF为例[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(3): 463-473.  
Nie Haikuan, Zhang Baiqiao, Liu Guangxiang, et al. Geological factors contributing to high shale gas yield in the Wufeng-Longmaxi Fms of Sichuan Basin: A case study of Well JY6-2HF in Fuling shale gas field[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(3): 463-473.
- [16] 方志雄.中国南方常压页岩气勘探开发面临的挑战及对策[J]. *油气藏评价与开发*, 2019, 9(5): 1-13.  
Fang Zhixiong. Challenges and countermeasures for exploration and development of normal pressure shale gas in southern China[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9(5): 1-13.
- [17] Land L S. Na-Ca-Cl saline formation waters, Frio Formation (Oligocene), south Texas, USA: Products of diagenesis[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(11): 2163-2174.
- [18] Wang H Y, Shi Z S, Zhao Q, et al. Stratigraphic framework of the Wufeng-Longmaxi shale in and around the Sichuan Basin, China: Implications for targeting shale gas[J]. *Energy Geoscience*, 2020, 1(3-4): 124-133.
- [19] 陈勇,王淼,王鑫涛,等.东营凹陷沙四段地层水化学特征及其指示意义[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(4): 42-52.  
Chen Yong, Wang Miao, Wang Xintao, et al. Chemical characteristics and implications of formation water of the Es<sub>4</sub> Member in Dongying sag[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(4): 42-52.
- [20] Hanor J S. Origin of saline fluids in sedimentary basins[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1994, 78(1): 151-174.
- [21] 楼章华,金爱民,朱蓉,等.论松辽盆地地下水动力场的形成与演化[J]. *地质学报*, 2001, 80(1): 111-120.  
Lou Zhanghua, Jin Aimin, Zhu Rong, et al. On the formation and evolution of groundwater dynamic field in Songliao Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 80(1): 111-120.
- [22] 楼章华,朱蓉.中国南方海相地层水文地质地球化学特征与油气保存条件[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(5): 584-593.  
Lou Zhanghua, Zhu Rong. Hydrogeological and hydrogeochemical characteristics and hydrocarbon preservation conditions in marine strata in southern China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(5): 584-593.
- [23] 马永生,楼章华,郭彤楼,等.中国南方海相地层油气保存条件综合评价技术体系探讨[J]. *地质学报*, 2006, 85(3): 406-417.  
Ma Yongsheng, Lou Zhanghua, Guo Tonglou, et al. An exploration on a technological system of petroleum preservation evaluation for marine strata in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 85(3): 406-417.
- [24] Zheng H R, Zhang J C, Qi Y C. Geology and geomechanics of hydraulic fracturing in the Marcellus shale gas play and their potential applications to the Fuling shale gas development[J].

- Energy Geoscience, 2020, 1(1-2): 36-46.
- [25] Li Y, Zhou D H, Wang W H, et al. Development of unconventional gas and technologies adopted in China[J]. Energy Geoscience, 2020, 1(1-2): 55-68.
- [26] 李双建,高波,沃玉进,等.中国南方海相油气藏破坏类型及其时空分布[J].石油实验地质,2011,33(1):43-49.  
Li Shuangjian, Gao Bo, Wo Yujin, et al. Destruction types and temporal-spatial distribution of marine hydrocarbon reservoirs in South China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(1): 43-49.
- [27] Nie H K, Li D H, Liu G X, et al. An overview of the geology and production of the Fuling shale gas field, Sichuan Basin, China[J]. Energy Geoscience, 2020, 1(3-4): 147-164.
- [28] Jin Z J, Nie H K, Liu Q Y, et al. Source and seal coupling mechanism for shale gas enrichment in upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 97: 78-93.
- [29] 聂海宽,汪虎,何治亮,等.常压页岩气形成机制、分布规律及勘探前景——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J].石油学报,2019,40(2):131-143.  
Nie Haikuan, Wang Hu, He Zhiliang, et al. Formation mechanism, distribution and exploration prospect of normal pressure shale gas reservoir: a case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(2): 131-143.
- [30] 何希鹏,张培先,房大志,等.渝东南彭水—武隆地区常压页岩气生产特征[J].油气地质与采收率,2018,25(5):72-79.  
He Xipeng, Zhang Peixian, Fang Dazhi, et al. Production characteristics of normal pressure shale gas in Pengshui-Wulong area, southeast Chongqing[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(5): 72-79.
- [31] 张金川,王志欣.深盆气藏异常地层压力产生机制[J].石油勘探与开发,2003,30(1):28-31.  
Zhang Jinchuan, Wang Zhixin. Formation mechanism of abnormal pressures in deep-basin gas accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 28-31.
- (编辑 黄颖)

(上接第21页)

- [13] 王淑芳,张子亚,董大忠,等.四川盆地寒武统筇竹寺组页岩孔隙特征及物性变差机制探讨[J].天然气地球科学,2016,27(9):1619-1628.  
Wang Shufang, Zhang Ziya, Dong Dazhong, et al. Pore characteristics and physical property variation mechanism of Lower Cambrian Qiongzhusi formation shale in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(9): 1619-1628.
- [14] 江凯禧,彭丽,何文祥,等.页岩气储层非均质性研究——以四川盆地寒武统筇竹寺组为例[J].海洋地质前沿,2014,30(8):47-54.  
Jiang Kaixi, Peng Li, He Wenxiang, et al. Heterogeneity of shale gas reservoir: a case study of Lower Cambrian Qiongzhusi formation in Sichuan Basin[J]. Marine Geology Frontier, 2014, 30(8): 47-54.
- [15] 刘忠宝,高波,武清钊,等.页岩有机-无机复合型孔隙及其控气作用——以川西南地区筇竹寺组为例[J].海相油气地质,2018,23(4):42-50.  
Liu Zhongbao, Gao Bo, Wu Qingzhao, et al. Organic inorganic composite pores in shale and their gas control: a case study of Qiongzhusi formation in Southwest Sichuan[J]. Marine Petroleum Geology, 2018, 23(4): 42-50.
- [16] 谢丹,韩书勇,周伟韬,等.井研—犍为地区筇竹寺组页岩气保存条件研究[J].天然气技术与经济,2018,12(2):24-27.  
Xie Dan, Han Shuyong, Zhou Weitao, et al. Study on shale gas preservation conditions of Qiongzhusi formation in Jingyan Qianwei area[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2018, 12(2): 24-27.
- [17] 刘攀,张克银.四川盆地井研地区麦地坪—筇竹寺组高分辨率层序地层特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2018,45(5):585-593.  
Liu Jiang, Zhang Keyin. High resolution sequence stratigraphy of maidiping-qiongzhusi formation in Jingyan area, Sichuan Basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 45(5): 585-593.
- [18] 刘攀,张克银.井研—犍为地区麦地坪—筇竹寺组沉积相特征[J].科学技术与工程,2018,18(2):20-25.  
Liu Jiang, Zhang Keyin. Sedimentary facies characteristics of maidiping and Qiongzhusi formation in Jingyan Qianwei area[J]. Science and Technology and Engineering, 2018, 18(2): 20-25.
- [19] 汪泽成,姜华,王铜山,等.四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J].石油勘探与开发,2014,41(3):305-312.  
Wang Zecheng, Jiang Hua, Wang Tongshan, et al. Paleogeomorphic characteristics and hydrocarbon accumulation significance of Tongwan period in Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 305-312.
- [20] 田兴旺,胡国艺,苏桂萍,等.川南威远地区W201井古生界海相页岩矿物特征[J].新疆石油地质,2018,39(4):409-415.  
Tian Xingwang, Hu Guoyi, Su Guiping, et al. Mineral characteristics of Paleozoic marine shale from well W201 in Weiyuan area, southern Sichuan[J]. Petroleum Geology of Xinjiang, 2018, 39(4): 409-415.
- [21] 任东超,王晓飞,刘冬冬,等.威远地区筇竹寺组选区评价标准及有利勘探区预测[J].非常规油气,2017,4(5):38-43.  
Ren Dongchao, Wang Xiaofei, Liu Dongdong, et al. Evaluation criteria and favorable exploration area prediction of Qiongzhusi formation in Weiyuan area[J]. Unconventional Oil and Gas, 2017, 4(5): 38-43.
- [22] 刘斌,付育武.JY1HF井筇竹寺组页岩气体体积压裂实践[J].复杂油气藏,2016,9(3):69-73.  
Liu Bin, Fu Yuwu. Volume fracturing practice of shale gas in Qiongzhusi Formation of JY1 HF well[J]. Complex Oil and Gas Reservoirs, 2016, 9(3): 69-73.
- (编辑 黄颖)