

引用格式: 湛小红, 陈学辉, 刘超, 等. 重庆武隆五峰组—龙马溪组一段天生剖面特征研究[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(1): 150-159.

ZHAN Xiaohong, CHEN Xuehui, LIU Chao, et al. Characteristics of Tiansheng Outcrop in Wufeng Formation-1st Member of Longmaxi Formation, Wulong, Chongqing[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 150-159.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.013

## 重庆武隆五峰组—龙马溪组一段天生剖面特征研究

湛小红<sup>1</sup>, 陈学辉<sup>1</sup>, 刘超<sup>1</sup>, 何文斌<sup>2</sup>, 张志平<sup>3</sup>

(1. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 湖北 武汉 430223;

2. 中国石化重庆涪陵页岩气勘探开发有限公司, 重庆 408000; 3. 重庆地质矿产研究院, 重庆 401120)

**摘要:**以页岩储层作为切入点,通过对涪陵、南川、武隆地区构造简单、露头发育好、地层发育全、交通便利区进行踏勘优选,选择天生标准剖面作为研究对象。对天生剖面进行取样分析,结合已有的地震、钻井、测井与分析化验等资料,开展了地层沉积特征、矿物岩石学特征、有机地化特征、储集空间特征等方面研究。研究结果表明,该剖面处于构造相对稳定区,各小层发育特征明显,厚度变化不大,具有良好的横向可对比性,是一条具有代表性、典型性的观察研究剖面,可作为川渝地区页岩科研教学实验参考基地。同时,讨论提出了斑脱岩夹层的发育,对页岩品质及页岩气井压裂改造存在一定的影响,通过地面指示地下,为页岩气井的高效开发具有了一定指导意义。

**关键词:**页岩储层; 高效开发; 五峰组—龙马溪组一段; 天生标准剖面; 武隆地区

中图分类号: TE132

文献标识码: A

### Characteristics of Tiansheng Outcrop in Wufeng Formation- 1st Member of Longmaxi Formation, Wulong, Chongqing

ZHAN Xiaohong<sup>1</sup>, CHEN Xuehui<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>, HE Wenbin<sup>2</sup>, ZHANG Zhiping<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Exploration and Development, SINOPEC Jiangnan Oilfield, Wuhan, Hubei 430233, China;

2. Sinopec Chongqing Fuling Shale Gas Exploration and Development Co. Ltd., Chongqing 408000, China;

3. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 401120, China)

**Abstract:** Taking the shale reservoir as the starting point, Tiansheng standard section is selected as the research object by the survey and optimization of the areas with simple structure, well-developed outcrops, fully developed strata and convenient transportation in Fuling, Nanchuan and Wulong areas. The shale heterogeneity of the outcrop is characterized in the aspect of stratigraphy, mineralogy, petrography, organic geochemistry and storage space, combined with pre-existing seismic, drilling, logging, and laboratory petrophysical and geochemical analyses. The research results show that this section is located in an area of relative stable structure has good horizontal comparability, of which each small layer has typical development characteristics and the thickness changes little. It is a representative and typical observation and research section, which can be used as a reference base for shale scientific research and teaching in Sichuan and Chongqing Region. Meanwhile, it is pointed out that the development of bentonite interlayer has a certain influence on shale quality and shale gas well fracturing. This method of the surface indicating the underground provides a certain guiding significance for the efficient development of shale gas wells.

**Keywords:** shale reservoir; efficient development; Wufeng Formation-1st member of Longmaxi Formation; Tiansheng standard outcrop; Wulong area

收稿日期: 2022-01-01。

第一作者简介: 湛小红(1989—),女,硕士,助理研究员,主要从事气藏工程研究工作。地址:湖北省武汉市东湖高新区大学园路18号,邮政编码:430223。E-mail: zhanxh.jhyt@sinopec.com

通信作者简介: 陈学辉(1969—),男,硕士,高级工程师,长期从事中上扬子区天然气沉积储层研究工作。地址:湖北省武汉市东湖高新区大学园路18号,邮政编码:430223。E-mail: chenxh.jhyt@sinopec.com

基金项目: 中国石化科技攻关项目“页岩气开发调整区动态分析方法与生产规律研究”(P21011)。

页岩气属于清洁能源,是未来全球重点关注的能源焦点,随着全球经济逐步恢复增长,其需求必将持续增长,甚至有可能出现供不应求的局面<sup>[1]</sup>。重庆目前实现页岩气规模商业开发的主要为涪陵地区和南川地区,但此前重庆市乃至全国尚没有针对页岩气主力产层的直观展示剖面,开展重庆市五峰组—龙马溪组一段页岩气主力产层剖面研究,将有利于扩大页岩气勘探开发的影响,为建设全国页岩气科研、教学及实验基地打下坚实基础。

将页岩储层作为切入点,选取与涪陵、南川地区具有相同地质背景和条件的剖面作为备选剖面,通过资料收集、对比分析,选择剖面踏勘区域主要集中在七曜山断裂以东<sup>[2]</sup>。项目组共计完成16条野外剖面的踏勘,通过剖面详测、精细观察描述、系统采样与实验测试分析,对剖面特点进行了充分的对比分析,综合各方面因素,优选天生剖面和黄莺剖面两个标准地层剖面。选取天生剖面展示重庆市武隆区接龙乡五峰组—龙马溪组一段页岩气产层段地层学、

岩石学、沉积学、古生物学及地球化学等特征。

## 1 地质背景

研究区隶属重庆市武隆区,大地构造上位于四川盆地东南缘外侧,大娄山脉的西北侧。武隆地区属于扬子准地台(I级)上扬子台坳(II级)川东陷褶束(III级),是我国南部相对稳定的构造单元<sup>[3,4]</sup>。根据1:50万重庆市地质图说明书<sup>[5]</sup>、1:20万区域地质测量报告<sup>[6]</sup>,结合野外露头、钻井等资料,天生剖面区域地层发育良好,地层自下而上依次发育寒武系、奥陶系、志留系中下统、泥盆系中上统、二叠系、三叠系、侏罗系,岩性主要有碳酸盐岩、碎屑岩、硅质岩等,其中碳酸盐和碎屑岩占主体地位<sup>[7]</sup>。剖面区域内地层以古生界为主,其次为三叠系及少量的侏罗系,缺失第三系<sup>[2]</sup>。

天生剖面位于重庆市武隆区仙女山镇接龙乡天星村附近公路边,东临桐梓镇,北临接龙乡,西、北两

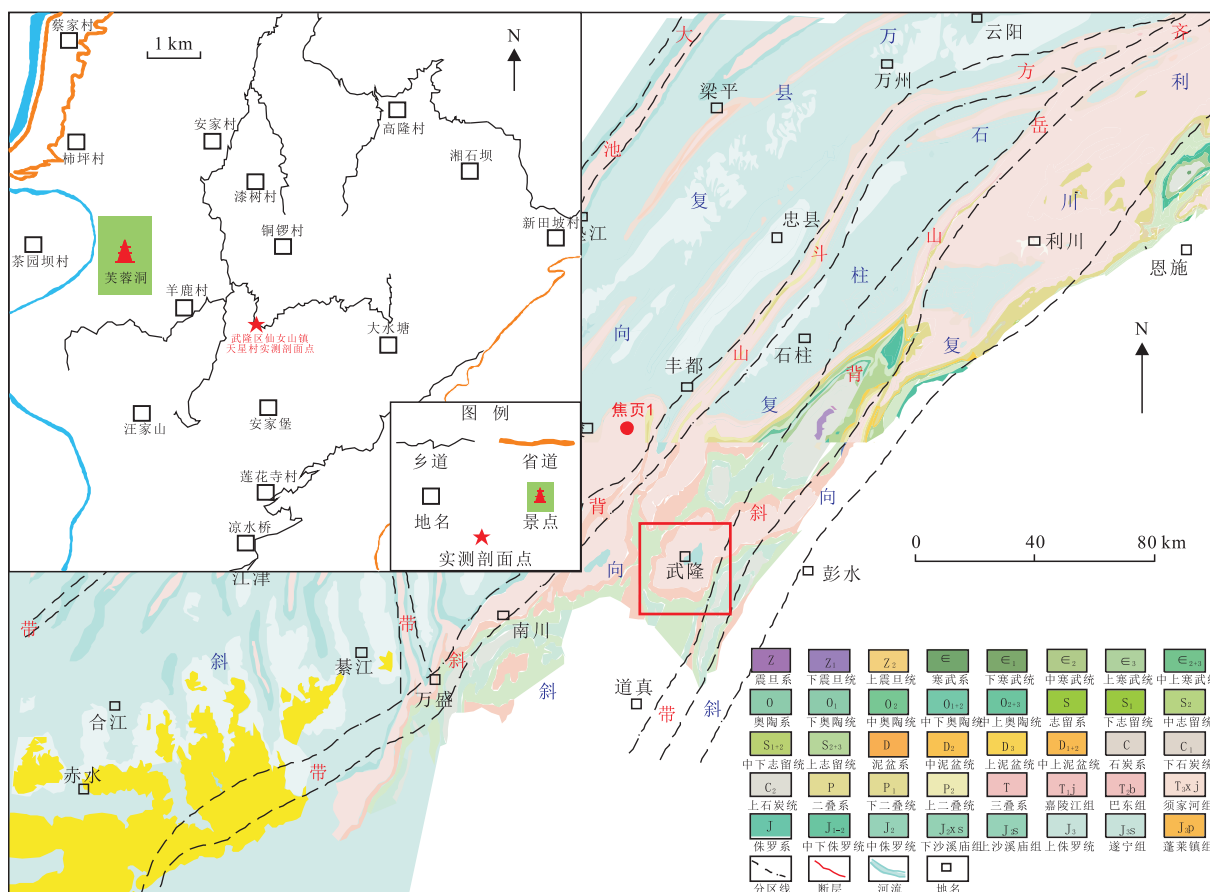


图1 重庆市武隆区地质构造分布及交通

Fig. 1 Geological structure and traffic map of Wulong, Chongqing

面与丰都县南天湖镇接壤,距接龙乡 5.83 km,距武隆城区约 47 km,处于重庆武隆景观片区,周边著名景点诸多,距离世界自然遗产保护地的武隆芙蓉洞仅 3 km,同时距离中国 5A 级武隆喀斯特旅游区的仙女山、天坑地缝国家地质公园不足 40 km(图 1)。

## 2 实测剖面概述

### 2.1 露头情况简介

天生剖面起点坐标 E 107°50'52" N 29°33'24", 终点坐标 E 107°54'16" N 29°30'05", 出露宝塔组、涧草沟组、五峰组炭质页岩、五峰组观音桥段生物灰岩及龙马溪组一段炭质页岩,界限清晰,整体构造变形较弱,龙马溪组一段上部地层局部呈冲沟或被植被覆盖。

天生剖面野外测制工作中,采用 GPS(全球定位系统)确定坐标,用皮尺或测绳丈量地面斜距,用地质罗盘测量导线的方位、导线坡角和地层产状。对好的地质现象进行了拍照,并配合样品采集,剖面精度按照 1:500 比例尺进行。按照“点—线—面”结合的原则,依据岩石地层学及生物地层学方法对天生剖面进行了小层划分,将天生剖面自下而上划分为 16 个小层,剖面真厚度 26.69 m(图 2)。

### 2.2 剖面分层及描述

通过野外实地勘察,经人工测量将天生剖面分成 16 层,累计厚度 26.96 m,具体岩性如下(图 3)。

上覆地层:下志留统龙马溪组二段( $S_1l$ )。

龙一段以上地层被植物掩盖,风化坡积物为龙



图 2 重庆市武隆区上奥陶统五峰组( $O_3w$ )—下志留统龙马溪组一段( $S_1l$ )天生剖面实测全景

Fig. 2 Panorama of Tiansheng Outcrop of Upper Ordovician Wufeng Formation( $O_3w$ )—1st member of Lower Silurian Longmaxi Formation( $S_1l$ ) in Wulong, Chongqing

马溪组灰黑色泥页岩。

—————整合—————

龙一段

16层:灰黑色含硅炭质泥岩,顶部呈中—薄层状;岩层断面见 1~2mm 褐色粉砂质水平纹层。

厚 5.28 m

15层:灰黑色中层状含粉砂含硅泥岩,粉砂质含量自下而上有增多趋势;风化产物呈细萝卜条状,笔石化石丰富。

厚 3.73 m

14层:灰黑色薄层状泥质细粉砂页岩。

厚 0.80 m

13层:灰黑色中—薄层状含泥含粉砂硅质页岩,风化表面呈现明显的铁锈色,局部呈球形风化,风化产物呈细条柱状。

厚 1.02 m

12层:灰黑色中层状含泥含粉砂硅质泥页岩,污手不明显,风化表面呈棱角状。

厚 1.42 m

11层:灰黑色厚—中层状含泥含粉砂硅质泥页岩,风化表面呈棱角状,笔石化石丰富。

厚 1.38 m

10层:灰黑色中层状炭质硅质泥页岩,风化表面呈棱角状。

厚 1.40 m

—————整合—————

五峰组

9层(观音桥段):下部为灰黑色中层状炭质粉砂岩,局部见球形风化;上部为中层状灰黑色介壳灰岩。

厚 0.75 m

8层:中层状灰黑色炭质硅质泥页岩,岩层风化表面呈明显棱角状。

厚 1.09 m

7层:灰黑色薄层状含细粉砂炭质硅质泥页岩。

厚 0.42 m

6层:灰黑色中—薄层状含细粉砂炭质硅质泥页岩。

厚 1.32 m

5层:灰黑色薄层状炭质硅质泥页岩夹灰色、灰黑色斑脱岩。

厚 0.72 m

4层:灰黑色中—薄层状炭质硅质泥页岩夹斑脱岩,斑脱岩自下而上颜色由灰色变为黑色。

厚 2.00 m

3层:灰黑色中层状含碳硅质泥页岩夹灰白色斑脱岩。

厚 0.71 m

2层:灰黑色中层状含炭质硅质岩夹灰色—灰白色斑脱岩。

厚 1.10 m

1层:灰黑色块状含炭质硅质灰岩,本层球形风化现象明显,风化产物较碎,不污手。

厚 1.55 m

-----假整合-----

涧草沟组

0层:灰色厚层块状灰质云岩,岩石可达细晶结构,含粒屑,含1~3 mm黄铁矿晶体集合体(或)团块。自下而上,灰质减少,渐变为云岩。 厚2.00 m

2.3 天生剖面五峰组—龙马溪组一段关键地层界面识别

1) 涧草沟组—五峰组界面

涧草沟组是一套灰色块状灰质云岩,且含黄铁矿集合体或团块;五峰组为黑色含炭质粉砂质页岩、含硅质页岩夹粉砂岩。该界面为岩性—岩相转换面(图4a)。

2) 五峰组—观音桥—龙马溪组一段界面

天生地区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组沉积时期受主要受来自西部的川中古隆起、南部的黔中古隆起和东南部江南—雪峰隆起的影响,上奥陶统五峰组沉积时期页岩岩性主要为黑色硅质页岩、炭质页岩以及粉砂质页岩等,厚度较薄,一般小于10 m<sup>[8]</sup>。五峰组上部观音桥段沉积时期由于受到全球冰期海平面下降的影响,岩性主要为泥灰岩和灰质页岩,厚度很薄,仅为几十厘米,部分地区甚至存在观音桥段缺失的现象<sup>[9]</sup>。龙马溪组下部沉积时期,短暂的冰期作用过后,冰川消融,海平面迅速上升,水深加大,沉积了一套厚度极大的龙马溪组黑色页岩<sup>[10]</sup>(图4b)。

3) 龙马溪组一段—二段界面识别

龙马溪一段为粉砂质炭质页岩,龙马溪二段为炭质页岩,砂质含量降低,在野外表现为差异性风化,相比砂质含量低页岩,砂质含量高页岩抗风化能力更强(图4c)。

3 剖面地质特征研究

3.1 地层沉积特征

3.1.1 岩石矿物特征

对天生剖面选取17块样品进行全岩X衍射实验,其中五峰组9块,龙马溪组一段8块。结果表明,天生剖面五峰组—龙马溪组一段矿物组分以石英为主,平均含量高达67.58%;其次为黏土矿物,平均含量为26.82%;钾长石、斜长石、菱铁矿、黄铁矿等含量较低,均在5%以下,各类矿物含量在不同组段含量差异存在一定差异(表1)。

天生剖面上奥陶统9块五峰组样品全岩X衍射实验结果显示,五峰组矿物成分相对较单一,以石英为主,平均为71.86%;其次为黏土矿物,平均含量为23.86%;钾长石、斜长石、菱铁矿和黄铁矿含量均在5%以下(图5)。

天生剖面龙马溪组一段8块样品全岩X衍射实验结果显示,下志留统龙马溪组一段矿物成分较五峰组相比存在一定差异:龙马溪组一段矿物组分以

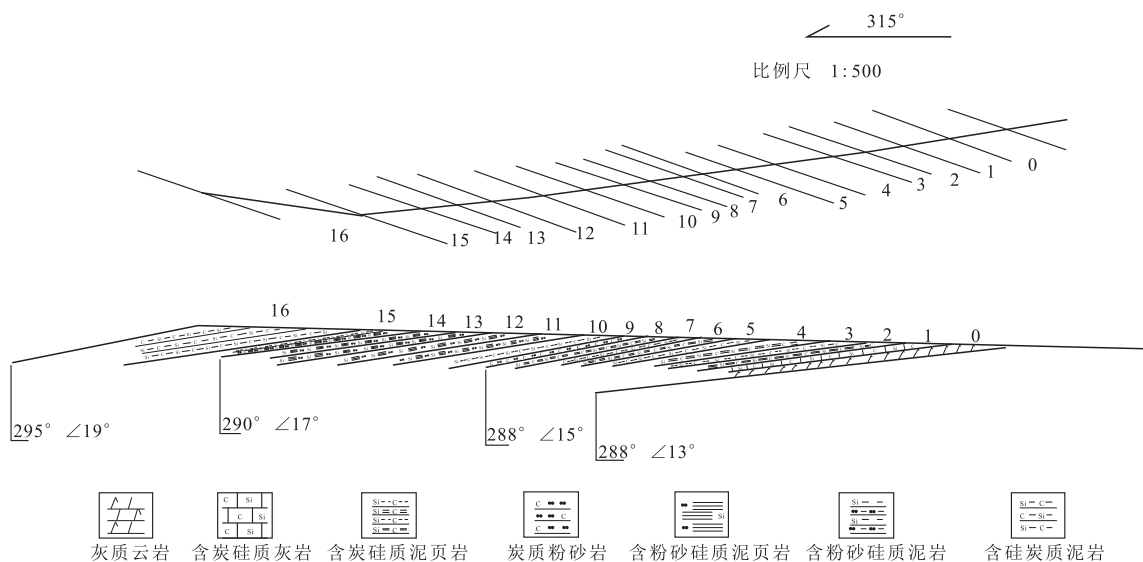


图3 重庆市武隆区天生标准剖面  
Fig. 3 Profile of Tiansheng standard outcrop, Wulong, Chongqing

石英为主,平均含量为62.78%,明显低于五峰组;其次为黏土矿物含量,平均含量为30.16%,明显高于五峰组;而长石含量明显高于五峰组,黄铁矿含量略低于五峰组;但全岩X衍射显示龙马溪组一段含有菱铁矿组分,而五峰组并不含这一矿物。

### 3.1.2 岩相类型及特征

重庆市武隆区接龙乡上奥陶统五峰组—下志留

统龙马溪组一段天生剖面主要发育细粉砂质泥页岩、炭质硅质泥页岩、介壳灰岩、硅质页岩、炭质页岩5种岩石类型,其特征如下。

1) 细粉砂质泥页岩:岩石以灰黑色和黑灰色为主,多呈中层状和块状,水平纹层发育,经常可见明暗相间的条纹互层,暗色条纹富炭质,亮色条纹富砂质,风化产物呈细萝卜条状,略显页理,岩石中常见顺层分布的笔石化石。镜下薄片显示粗粉砂含量

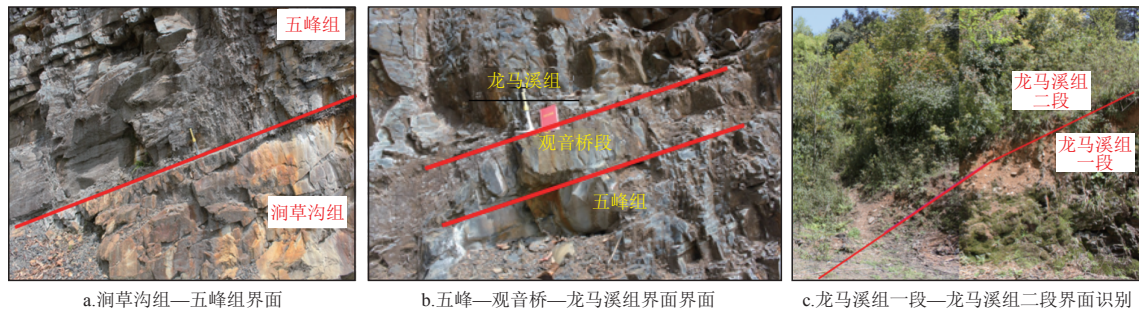


图4 重庆市武隆区天生剖面五峰组—龙马溪组关键地层界面识别

Fig. 4 Identification of key stratigraphic interfaces of Ordovician–Silurian in Tiansheng outcrop, Wulong, Chongqing

表1 重庆市武隆区天生剖面矿物组分统计

Table 1 Mineral composition statistics of Tiansheng outcrop, Wulong, Chongqing

层位	样品编号	岩性	平均矿物含量(%)					
			黏土	石英	钾长石	斜长石	菱铁矿	黄铁矿
五峰组	WLJL-02	炭质硅质灰岩	27.00	64.00	0	3.00	0	6.00
	WLJL-03	硅质页岩	28.20	66.60	1.10	3.30	0.80	0
	WLJL-04	硅质页岩	18.90	79.50	0	1.60	0	0
	WLJL-05-1	硅质页岩	34.90	60.60	1.00	3.50	0	0
	WLJL-05-2	硅质页岩	23.00	74.70	0	2.30	0	0
	WLJL-06	硅质页岩	19.00	78.60	0	2.40	0	0
	WLJL-07	硅质页岩	18.40	79.60	0	2.00	0	0
	WLJL-08	硅质页岩	20.50	73.30	0	2.30	0	3.90
	WLJL-09	硅质页岩	24.80	69.80	0	2.50	0	2.90
	平均		23.86	71.86	0.23	2.54	0.09	1.42
龙马溪组 一段	WLJL-11	硅质页岩	31.00	61.50	2.40	5.10	0	0
	WLJL-12	硅质页岩	22.00	65.50	3.90	5.50	0	3.10
	WLJL-13-1	硅质页岩	31.30	62.20	1.80	4.70	0	0
	WLJL-13-2	硅质页岩	28.90	63.30	2.50	5.30	0	0
	WLJL-14	含泥硅质页岩	28.90	66.40	1.30	3.40	0	0
	WLJL-15	含泥硅质页岩	34.00	60.80	1.70	3.50	0	0
	WLJL-16	含泥硅质页岩	30.40	63.20	2.80	3.60	0	0
	WLJL-17	含泥炭质泥岩	34.80	59.30	4.00	1.90	0	0
	平均		30.16	62.78	2.55	4.13	0	0.39

低,一般在5%以下;细粉砂含量较高,在65%左右,多为石英及少量长石;黏土含量30%左右;黄铁矿含量少,一般在5%以下(图5a)。

2) 炭质硅质泥页岩:岩石呈灰黑色,较污手,页理发育,炭质硅质泥页岩中经常夹有浅灰色、灰黑色斑脱岩夹层,斑脱岩夹层中偶尔可见黄铁矿结核,斑脱岩层厚一般为1.5~5 cm,风化产物较碎,呈棱角状,风化表面铁锈色明显,笔石化石丰富。镜下薄片观察显示黏土含量30%左右,富含炭质;硅质含量一般在50%左右;砂质含量较低,多为石英及少量长石(图5b)。

3) 介壳灰岩:全剖面介壳灰岩厚度大概75 cm,发育于上奥陶统五峰组观音桥段,灰黑色,赫南特贝化石特别发育(图5c),镜下显示泥晶结构,粒屑含量较高,大小可达0.01~0.04 mm(图5d)。

4) 硅质泥页岩:灰黑色中一薄层状,主要成分为泥质和硅质,含少量炭质,硅质泥页岩中常夹有浅灰色、黄灰色斑脱岩夹层。岩石风化表面多棱角状,可见页理,阶梯状破裂缝非常发育,破裂缝表面铁锈色明显。镜下薄片显示硅质含量70%以上,部分集

合体富集呈线纹状,黏土含量20%左右,其余为细粉砂及黄铁矿(图5e)。

5) 炭质泥页岩:灰黑色,主要成分为泥质和炭质,岩石污手明显,易碎成页片状,页理欠发育,笔石发育(图5f)。

### 3.1.3 沉积相特征

重庆市武隆区接龙乡上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组一段天生剖面主要为一套深水陆棚沉积的富有机质页岩。野外露头观察到丰富的深水陆棚岩相标志:暗色富有机质灰岩、暗色富硅质泥页岩、暗色富有机质砂质泥页岩等。

暗色富有机质云岩,有机碳含量(*TOC*)相对较高,一般在2%以上,富含灰质和云质,滴酸有起泡反应,薄片未发现自生硅质,化石主要为笔石类化石,岩石富含黄铁矿,呈星散状分布于岩石中,主要发育于剖面底部的涧草沟组和五峰组观音桥段,该岩石类型反应了水体相对较深的深水混积陆棚微相沉积环境。

暗色富硅质富有机质泥页岩,主要为硅质泥页岩和炭质硅质泥页岩,*TOC*普遍高于3%,自生硅质含量高,富含笔石化石和海绵、放射虫及骨针的硅质骨骼类生物化石,黄铁矿较为发育,多呈星散状分布于岩石中,纹层及页理欠发育,但阶梯状破裂缝发育,反应水体相对较深的深水硅泥质陆棚微相沉积环境。

暗色富有机质砂质泥页岩,*TOC*为3%左右,陆源硅质含量相对较高,自生硅质含量较低,化石类型较为单一,主要为笔石类化石,发育粉砂质粗纹层和条带,发育黄铁矿,多呈星散状分布于粉砂质条带或纹层中,指示水体相对较深的深水砂泥质陆棚微相沉积环境。

暗色富有机质泥页岩,*TOC*含量普遍高于3%,含有大量的笔石类化石,黄铁矿较发育,呈星散状或纹层状,页理发育,主要位于剖面中上部,是典型的深水泥质陆棚沉积产物。

天生剖面普遍可见的笔石类生物化石、海绵、放射虫和骨针等硅质类骨骼生物化石,都是代表了典型的深水陆棚沉积亚相<sup>[11]</sup>。

此外,天生剖面中可见多套斑脱岩(火山凝灰岩)夹层,表明在五峰组—龙马溪组一段沉积早期,扬子板块与华北板块中间的商丹洋南北两侧逐渐由

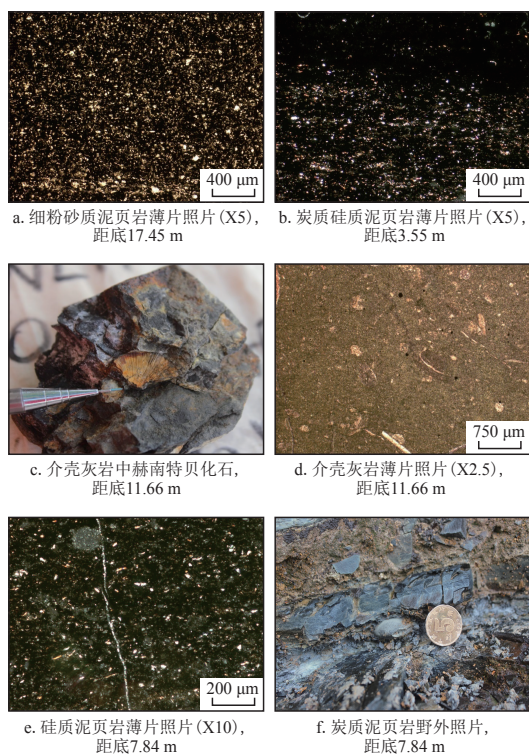


图5 重庆市武隆区天生剖面岩石类型

Fig. 5 Lithofacies type of Tiansheng outcrop, Wulong, Chongqing

原来的被动大陆边缘转变为活动大陆边缘,火山活动逐渐增加,海底热泉及上升洋流发育,造成海水中富含硅质和各种营养物质,加上当时较为封闭的滞留盆地沉积环境,对于自生硅质和有机质的生成及保存十分有利,形成了有机质含量和硅质含量“双高”的典型特征,更是深水陆棚沉积的特征之一<sup>[12-15]</sup>。

根据上述岩相标志、古生物标志及沉积构造现象,认为天生剖面所处沉积环境为滨外陆棚环境。同时,进一步将滨外陆棚相细分成深水陆棚微相,根据主要岩相特征,划分出了深水混积陆棚、深水硅质陆棚、深水砂泥质陆棚3种沉积微相(表2)。

### 3.2 有机地化特征

#### 3.2.1 有机质丰度及纵向变化特征

重庆市武隆区接龙乡上奥陶五峰组一下志留统龙马溪组一段天生剖面17块实测有机碳实验结果表明,剖面实测有机碳含量最小为1.10%,最大为5.94%,平均为4.14%。

天生剖面上奥陶统五峰组实测有机碳含量最小值为3.26%,最大值为5.20%,平均为4.03%;天生剖面下志留统龙马溪组一段实测有机碳含量最小值为1.10%,最大值为5.94%,平均为4.28%;整个剖面纵向上除了16小层有机碳异常低之外,其他小层有机碳含量差异不大,变化如表3。

#### 3.2.2 有机质类型和成熟度

通过沥青反射率( $R_b$ )实验测定结果,计算得到镜质体反射率( $R_o$ )。计算结果表明, $R_o$ 值基本上都在2%左右或者大于2%,说明天生剖面五峰组—龙马溪组一段页岩母质演化程度已达高成熟—过成熟阶段,处于过成熟晚期生气阶段(表4)。

结合有机质成熟度来看,天生剖面五峰组—龙马溪组一段的页岩已处于过成熟热演化时期,各种

文献资料表明,通过干酪根显微组分测试方法鉴定时代老、埋藏深、高变质或过成熟烃源岩中的干酪根类型会出现较大的误差<sup>[16]</sup>,鉴定结果可能出现未成熟阶段是I型,而在成熟阶段变成II型甚至III型的现象<sup>[17]</sup>。而沉积有机质的碳同位素主要与原始有机质的来源及沉积环境有关,其组成继承了生物先质的碳同位素特征,且相对于其生物先质而言,经历了成岩作用和热成熟作用的干酪根,碳同位素组成不会发生明显的变化,因此,在油气领域利用干酪根碳同位素来划分有机质类型相对于显微组成测试方法适应性更好<sup>[18-19]</sup>,目前针对四川盆地地下古生界泥页岩有机质类型的确定,基本上以烃源岩干酪根碳同位素

表3 重庆市武隆区天生剖面实测有机碳含量

Table 3 Measured organic carbon content of Tiansheng outcrop, Wulong, Chongqing

层位	样品编号	岩性	厚度(m)	TOC(%)
五峰组	WLJL-02	炭质硅质灰岩	9.66	5.20
	WLJL-03	硅质页岩		3.26
	WLJL-04	硅质页岩		3.58
	WLJL-05-1	硅质页岩		3.75
	WLJL-05-2	硅质页岩		4.00
	WLJL-06	硅质页岩		3.45
	WLJL-07	硅质页岩		3.76
	WLJL-08	硅质页岩		4.90
	WLJL-09	硅质页岩		4.34
龙马溪组一段	WLJL-11	硅质页岩	15.03	5.50
	WLJL-12	硅质页岩		5.94
	WLJL-13-1	硅质页岩		5.59
	WLJL-13-2	硅质页岩		4.07
	WLJL-14	含泥硅质页岩		3.68
	WLJL-15	含泥硅质页岩		4.60
	WLJL-16	含泥硅质页岩		3.73
	WLJL-17	含硅炭质泥岩		1.10

表4 重庆市武隆区天生剖面镜质体反射率计算结果

Table 4 Vitrinite reflectance calculation results of Tiansheng outcrop, Wulong, Chongqing

层位	样品编号	岩性	距底深度(m)	样品数量	分组	测点数	$R_b$ (%)	$R_o$ (%)
五峰组	WLJL-05-1	硅质页岩	5.96	1	2.3-3.5	23	2.76	2.19
龙马溪组一段	WLJL-13-1	硅质页岩	14.94	1	2.1-2.7	21	2.44	1.98

表2 重庆市武隆区天生剖面沉积相划分

Table 2 Sedimentary facies division of Tiansheng outcrop, Wulong, Chongqing

相	亚相	微相	分布小层
		深水混积陆棚	9
滨外陆棚	深水陆棚	深水硅泥质陆棚	2-8、10-11、13、15-16
		深水砂泥质陆棚	1、12、14

或有机岩石学分析为准<sup>[20]</sup>。

天生剖面五峰组—龙马溪组一段沉积环境为深水陆棚环境,主体处于闭塞滞留沉积环境,从野外剖面取样、钻井取心资料上看,该层位笔石十分发育,其食物链底端的水生生物即浮游生物和菌藻类勃发,局部有放射虫和硅质海绵骨针,沉积母质输入以水生低等生物占绝对优势,从原始生物来源看,有机质类型以腐泥型干酪根为主。同时,研究区目的层烃源岩干酪根碳同位素测试结果主要介于-31‰~-28‰,参照前人在四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组有机质类型的确定(表5)<sup>[21]</sup>,认为天生剖面五峰组—龙马溪组一段有机质类型以I型为主。

### 3.3 储集空间类型及特征

在野外露头观察基础上,结合薄片、扫描电镜、氩离子抛光-扫描电镜等各方面的资料,对天生剖面储集空间进行了分类,主要包括无机孔隙、有机质孔隙、微裂缝、构造缝4种。

天生剖面页岩段普遍发育无机孔隙,主要包括碎屑孔隙(粒间孔、粒内溶孔)和黏土孔隙。黏土孔隙主要为黏土矿物晶间孔隙,系黏土矿物在成岩演化过程中矿物晶体体积缩小而在晶体间生成的晶间孔,孔隙体积较大,孔径多集中在几百微米至微米之间,按照IUPAC孔隙尺度分类结果,属于大孔级别。碎屑孔隙主要包括粒内溶孔和粒间孔,粒内溶孔为成岩过程中碎屑颗粒内部发生溶蚀作用所形成的孔隙,具备溶蚀港湾状边缘,孔隙尺度较大,多集中在几百纳米至数微米之间,多为大孔级别(图6a)。粒间孔隙为经历过压实作用后残留的颗粒间孔隙,多呈不规则状,孔隙尺度一般较大,集中在几百纳米至数微米之间,多为大孔级别,碎屑孔隙局部较发育,孔隙间连通性相对较好(图6b)。

有机质孔隙主要为有机质在热演化中,由未成熟固体干酪根向低密度烃类流体转化过程所产生,其发育程度与有机质含量密切相关<sup>[22]</sup>,机质孔隙形

状呈近圆形、椭圆形、多边形、不规则形等,主要为纳米孔及微米孔,在平面上呈孤立状,有较好的边界。

研究区五峰组—龙马溪组一段富有机质泥页岩沉积后经历了深埋藏—抬升变浅的构造演化过程,在后期的抬升过程中,上覆地层遭受剥蚀导致地层压力下降,形成了五峰组—龙马溪组地层内部压力大于上覆地层压力,地层内部应力释放过程中形成了大量的近水平产状的微裂缝<sup>[23]</sup>。天生剖面微裂缝作为储集空间之一,主要以页理缝为主,常出现在纹层发育段,在刚性矿物与塑性矿物间易于形成页理缝<sup>[24]</sup>(图6c)。

天生剖面中发育的构造缝以直劈缝和高角度构造剪切缝为主,裂缝缝宽较大,缝高延伸较远,规模较大(图6d)。

基于上述研究,天生剖面五峰组—龙马溪组一段黑色页岩各小层石英的含量都比较高,含量介于50%~80%,并且五峰组矿物的石英含量明显高于龙马溪组一段,而在龙马溪组中段石英含量有明显下降趋势。此剖面中,碳酸盐矿物含量很少,黏土矿物含量中等,在25%左右,五峰组低于龙马溪组,在龙马溪组中段黏土矿物有上升趋势。总体看,脆性矿物含量不低于60%,黏土矿物不超过30%,泥页岩厚度稳定,大于30m;该剖面主要为深水陆棚相、浅水陆棚相,具体可分为炭质陆棚、粉砂质陆棚、钙质炭质陆棚、硅质炭质陆棚等微相,主要为厌氧还原环境和氧化弱还原环境;TOC大于1%;剖面裂缝发育(图7)。

综合评价,认为天生剖面五峰—龙马溪组一段

表5 烃源岩干酪根碳同位素划分标准<sup>[21]</sup>  
Table 5 Standard of kerogen carbon isotope types in hydrocarbon source rocks<sup>[21]</sup>

干酪根类型	腐泥型 (I)	腐殖腐泥型 (II <sub>1</sub> )	腐泥腐殖型 (II <sub>2</sub> )	腐殖型 (III)
$\delta^{13}C$	< -28‰	[-28‰, -26.5‰)	[-26.5‰, -25‰)	$\geq$ -25‰

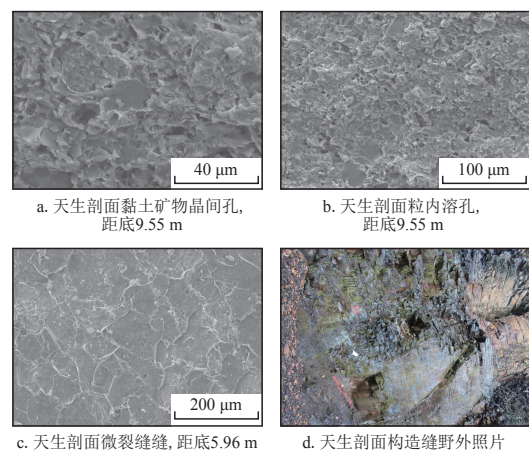


图6 重庆市武隆区天生剖面储集空间类型  
Fig. 6 Storage space type of Tiansheng outcrop, Wulong, Chongqing

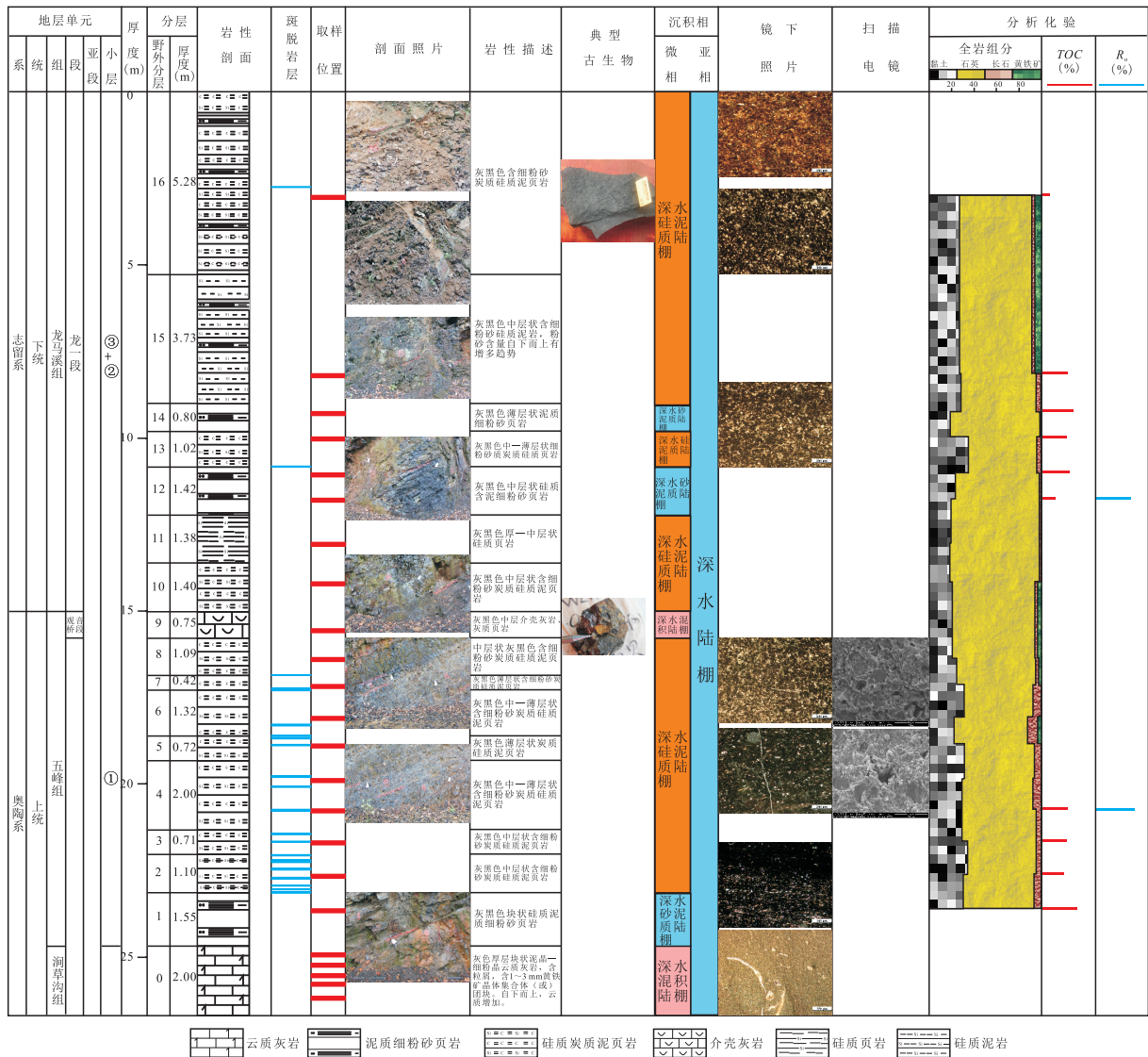


图7 重庆市武隆区天生剖面综合柱状图

Fig. 7 Comprehensive histogram of Tiansheng outcrop, Wulong, Chongqing

黑色页岩具有总有机碳含量高、脆性矿物含量高、裂缝发育等特点,与涪陵地区已有页岩气井相应层位具有较好的对比性,具有典型性,可以作为区域内五峰组—龙马溪组页岩主力产层典型参考剖面。

#### 4 讨论

1) 本剖面处于构造相对稳定区,地层未发生扭曲或褶皱变形,各小层在不同地区发育特征明显,厚度变化不大,具有良好的横向可对比性,是一条较好的观察研究剖面。

2) 天生剖面五峰组和龙马溪组一段主要矿物

含量存在较大的差异:五峰组石英含量明显高于龙马溪组,黏土矿物、长石含量显著小于龙马溪组,而岩石的矿物组分含量很大程度上控制了岩石的脆性,继而决定了储层压裂改造的难易程度,因此,针对穿行五峰组—龙马溪组不同层位气井,压裂改造方案应有所不同。

3) 天生剖面斑脱岩较为发育,以夹层的形式出现,斑脱岩夹层中偶见黄铁矿集合体。斑脱岩主要由火山灰、晶屑组成,质地软,塑形强,在斑脱岩发育的层段进行储层压裂改造,压裂缝造缝易延着夹层方向延伸,不利于形成复杂缝网,可能对页岩气井产能影响较大。

参考文献

- [1] 邹才能,赵群,丛连铸,等.中国页岩气开发进展、潜力及前景[J].天然气工业,2021,41(1):1-14.  
ZOU Caineng, ZHAO Qun, CONG Lianzhu, et al. Development progress, potential and prospect of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(1): 1-14.
- [2] 常隆庆.重庆南川间地质志[R].重庆:中国西部科学院地质研究所,1933.  
CHANG Longqing. Geological records of Nanchuan, Chongqing [R]. Chongqing: Research Institute of Geology, Western Chinese Academy of Sciences, 1933.
- [3] 陈思,马磊,李德万,等.重庆武隆岩溶国家地质公园古生代—中生代沉积环境与古地理研究[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.  
CHEN Si, MA Lei, LI Dewan, et al. Paleozoic-Mesozoic sedimentary environment and paleogeography of Wulong Karst National Geopark, Chongqing[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [4] 陈思,廖云平,马斌,等.重庆武隆岩溶国家地质公园古生代—中生代构造演化研究[M].武汉:中国地质大学出版社,2014.  
CHEN Si, LIAO Yunping, MA Bin, et al. Paleozoic-Mesozoic sedimentary tectonic evolution of Wulong Karst National Geopark, Chongqing[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [5] 邓传俊.重庆市1/50万旅游地质图说明书:重庆市城市地质系图之四[R].重庆:重庆市地矿局208水文工程地质队,1987.  
DENG Chuanjun. Description of 1/500 000 tourism geological map of Chongqing: The fourth map of urban geology of Chongqing[R]. Chongqing: 208 hydrological engineering geology team of Chongqing Bureau of Geology and mineral resources, 1987.
- [6] 周庆.重庆龙洞—江口地区矿产地质调查报告[R].毕节:贵州省地矿局区调队,2016.  
ZHOU Qing. Geological survey report of mineral resources in Longdong Jiangkou area, Chongqing[R]. Bijie: Regional survey team of Guizhou bureau of Geology and mineral resources, 2016.
- [7] 史文强,张远海,陈伟海,等.重庆武隆岩溶洞穴地质遗迹图幅示范调查成果及意义[C]//中国地质学会,2016.  
SHI Wenqiang, ZHANG Yuanhai, CHEN Weihai, et al. Demonstration survey results and significance of geological relics map of karst caves in Wulong, Chongqing[C]// Geological Society of China, 2016.
- [8] 戎嘉余,陈旭,王烽,等.奥陶—志留纪之交黔中古陆的变迁:证据与启示[J].中国科学:地球科学,2011,41(10):1407-1415.  
RONG Jiayu, CHEN Xu, WANG Yi, et al. Northward expansion of Central Guizhou Oldland through the Ordovician and Silurian transition: Evidence and implications[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2011, 41(10): 1407-1415.
- [9] 王淑芳,董大忠,王玉满,等.四川盆地志留系龙马溪组富气页岩地球化学特征及沉积环境[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(6):1203-1212.  
WANG Shufang, DONG Dazhong, WANG Yuman, et al. Geochemical characteristics the sedimentation environment of the gas-enriched shale in the Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(6): 1203-1212.
- [10] 樊隽轩, MELCHIN M J, 陈旭,等.华南奥陶—志留系龙马溪组黑色笔石页岩的生物地层学[J].中国科学:地球科学,2012,42(1):130-139.  
FAN Junxuan, MELCHIN M J, CHEN Xu, et al. Biostratigraphy and geography of the Ordovician-Silurian Lungmachi black shales in South China[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2012, 42(1): 130-139.
- [11] 易定鑫,田景春,井翠,等.五峰组—龙马溪组笔石带划分与沉积环境的意义——以重庆武隆接龙剖面为例[J].东北石油大学学报,2019,43(6):33-43.  
YI Dingxin, TIAN Jingchun, JING Cui, et al. Graptolite biostratigraphy and sedimentary environment significance: A case study from the Wufeng Formation-Longmaxi Formation of Jielong Section in Wulong, Southeastern Chongqing[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(6): 33-43.
- [12] 舒逸,陆永潮,刘占红,等.海相页岩中斑脱岩发育特征及对页岩储层品质的影响——以涪陵地区五峰组—龙马溪组一段为例[J].石油学报,2017,38(12):1371-1380.  
SHU Yi, LU Yongchao, LIU Zhanhong et al. Development characteristics of bentonite in marine shale and its effect on shale reservoir quality: a case study of Wufeng Formation to Member 1 of Longmaxi Formation, Fuling area[J]. Acta Petroli Sinica, 2017, 38(12): 1371-1380.
- [13] 王玉满,李新景,王皓,等.四川盆地东部上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组斑脱岩发育特征及地质意义[J].石油勘探与开发,2019,46(4):653-665.  
WANG Yuman, LI Xinjing, WANG Hao, et al. Developmental characteristics and geological significance of the bentonite in the Upper Ordovician Wufeng-Lower Silurian Longmaxi Formation in eastern Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(4): 653-665.
- [14] 王玉满,李新景,陈波,等.中上扬子地区埃隆阶最厚斑脱岩层分布特征及地质意义[J].天然气地球科学,2018,29(1):42-54.  
WANG Yuman, LI Xinjing, CHEN Bo, et al. Distribution characteristics and geological significance of the thickest Aeronian bentonite bed in Middle-Upper Yangtze Region[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(1): 42-54.
- [15] 邱振,卢斌,陈振宏,等.火山灰沉积与页岩有机质富集关系探讨——以五峰组—龙马溪组含气页岩为例[J].沉积学报,2019,37(6):1296-1308.  
QIU Zhen, LU Bin, CHEN Zhenhong, et al. Discussion of the relationship between volcanic ash layers and organic enrichment of black shale: A case study of the Wufeng-Longmaxi gas shales in the Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(6): 1296-1308.