

引用格式:熊亮,董晓霞,赵勇,等.四川盆地华蓥山五峰组—龙马溪组剖面特征及其勘探意义[J].油气藏评价与开发,2022,12(1):58-67.  
XIONG Liang, DONG Xiaoxia, ZHAO Yong, et al. Characteristics and exploration significance of Wufeng-Longmaxi Formation stratigraphic section in Mount Huaying, Sichuan Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 58-67.  
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.005

## 四川盆地华蓥山五峰组—龙马溪组剖面特征及其勘探意义

熊亮,董晓霞,赵勇,魏力民,王同,王岩  
(中国石化西南油气分公司,四川成都610041)

**摘要:**近年来,四川盆地龙马溪组页岩气勘探已全面展开,但复杂构造带领域攻坚还在探索,开展四川盆地内高陡构造带华蓥山地区三百梯剖面的系统研究,可为复杂构造带页岩气的勘探突破提供思路。通过开展剖面岩性、古生物、矿物成分、地化特征、孔隙类型及结构等多方面研究,并与邻区钻井进行对比后认为:①华蓥山剖面出露良好,五峰组至龙马溪组底部页岩地层完整连续,五峰组分为2段,龙马溪组(未见顶)分为3段,WF2-LM9笔石带发育齐全。由下至上沉积环境由还原向氧化过渡,生物硅质环境遭受破坏,陆源碎屑含量增加,有机质丰度呈下降趋势。五峰组—龙一段有机质较为富集,脆性矿物含量高,储集空间以有机孔为主,无机孔、微裂缝发育,孔隙结构以墨水瓶孔为主,少量狭缝形孔。②在赫南特期—鲁丹期,川南地区华蓥山三百梯剖面尽管仍位于深水陆棚相带,但局部发育水下高地微古地貌,由于底流作用、可容纳空间等因素影响,富有机质页岩沉积厚度较薄,微古地貌对于页岩气形成的物质基础具有重要的影响,可为下一步龙马溪组选区评价提供思路。③五峰组—龙一段优质页岩储层形成主要受控于火山作用、物源供给、还原环境的共同作用。

**关键词:**地层剖面;笔石带;斑脱岩;龙马溪组;华蓥山

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

### Characteristics and exploration significance of Wufeng-Longmaxi Formation stratigraphic section in Mount Huaying, Sichuan Basin

XIONG Liang, DONG Xiaoxia, ZHAO Yong, WEI Limin, WANG Tong, WANG Yan

(Sinopec Southwest Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** In recent years, the exploration of Longmaxi Formation in Sichuan Basin has been successful, but the shale gas of the complex structural belt's Longmaxi Formation are still the next areas for exploration. Therefore, it is necessary to carry out systematic researches on the Sanbaiti section in Mount Huaying of high-steep structural belt in Sichuan Basin, so as to provide ideas for the further exploration breakthrough. The section's lithology, paleontology, mineral composition, geochemical characteristics, pore type and structure are studied, and compared with the drilling wells of adjacent areas. The findings are as follows. ①The outcrop in Mount Huaying section is well exposed. The shale strata from Wufeng Formation to the bottom of Longmaxi Formation are complete and continuous. Wufeng Formation is divided into two sections, and the Longmaxi Formation (no top) is divided into three sections. The WF2-LM9 graptolite biozone is well developed. From the bottom to the top, the sedimentary environment changed from reduction to oxidation, and the biogenic siliceous environment has been destroyed. The injection amount of terrigenous debris increases, and the abundance of organic matter shows a downward trend. The organic matter in Long-1 member of Wufeng Formation is relatively rich, and the content of brittle minerals is high. The reservoir space is dominated by organic pores, followed by inorganic pores and microfractures. The pore structure is dominated by ink bottles, and a small amount of slit pores. ②For the Hirnantian-Rhuddanian, although the Sanbaiti section of Mount Huaying is located in the deep-water shelf zone

收稿日期:2021-05-31。

**第一作者简介:**熊亮(1975—),男,硕士,研究员,从事石油地质勘探、非常规油气勘探开发及生产管理等工作。地址:成都市高新区吉泰路688号,邮政编码:610041。E-mail:xiongliang.xnyq@sinopec.com

**通讯作者简介:**王同(1987—),男,博士,副研究员,从事非常规油气地质工作。地址:成都市高新区吉泰路688号,邮政编码:610041。E-mail:mrmenzu@aliyun.com

**基金项目:**中国石化科技部重大专项“川南复杂构造区页岩气勘探开发关键技术”(P21042-1);中国石化西南油气分公司科技项目“赤水—丁山页岩气形成与富集差异性研究”(KJ-581-2005)。

in southern Sichuan, the underwater highland micro-paleogeomorphology is locally developed. Due to the influence of undercurrent and other factors, the deposition thickness of organic-rich shale is thin. So that, the micro-paleogeomorphology has an important influence on the material basis of shale gas formation, which can provide ideas for the further evaluation of Longmaxi Formation. ③ The formation of organic-rich shale reservoirs in Long-1 member of Wufeng Formation is mainly controlled by the combined action of volcanism, source supply and reduction environment.

**Keywords:** stratigraphic section; graptolite biozone; bentonite; Longmaxi Formation; Mount Huaying

近年来,随着页岩气勘探理论及技术的不断进步,四川盆地龙马溪组已提交探明储量超过 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,主要集中在中浅层(埋深小于3 500 m)和超压区(地压系数大于1.2)。盆缘常压及盆内深层页岩气是下一步攻关主要方向。目前的勘探实践证明,盆内深层页岩气勘探开发还存在诸多问题<sup>[1-3]</sup>。早在2017年,成都地质调查中心在华蓥山背斜四海山构造高点部署了华地1井,首次在川东高陡构造带获得了页岩气流,开辟了四川盆地页岩气勘探新领域,对于盆内高陡构造带的勘探具有重要意义<sup>[4]</sup>。盆内华蓥山露头区的研究较多<sup>[5-6]</sup>,但并未系统开展剖面地层、地化、储层特征研究。通过对华蓥山剖面系统地观测,开展页岩气形成物质基础研究,理清富有机质页岩形成的主控因素,以期对下一步的勘探突破提供思路。

### 1 区域地质概况

华蓥山三百梯剖面位于四川省广安市华蓥市溪口镇觉庵村红岩煤矿公路北侧,距离溪口镇约3 km,交通便利。属于丘陵、中低山地貌。由于华蓥山断裂

是自寒武纪以来的继承性活动带<sup>[7]</sup>,华蓥山剖面构造位于川东高陡构造带华蓥山复式背斜南翼,剖面出露完整,分界清晰,古生物发育,观测方便(图1)。

### 2 剖面地层—沉积特征

该次重点针对五峰组、龙马溪组岩石组合、沉积环境等进行研究,实测了华蓥市溪口镇五峰组—龙马溪组实测地层剖面,剖面长116.60 m,出露良好,五峰组分为2段,龙马溪组(未见顶)分为3段(图2)。

五峰组根据岩性和古生物特征可划分为2段:

五峰组一段(层3—层6):对应凯迪阶(447.62 ~ 445.16 Ma),黑色碳质页岩夹硅质岩(图3a—图3c),局部见5层斑脱岩。底界与临湘组灰色泥质灰岩整合接触,顶界与观音桥段整合接触,厚5.21 m,沉积速率2.11 m/Ma。硅质矿物63.35%,黏土矿物35.07%,碳酸盐矿物0.37%。笔石动物群丰富,以叉笔石属*Dicellograptus Hopkinson*为常见(图3d)。在五峰组层2开始可观察到WF2-WF4笔石带,见装饰叉笔石*Dicellograptus ornatus*,标准棠垭笔石*Tangyagraptus typicus* Mu,短缩直管笔石*Rectograptus*

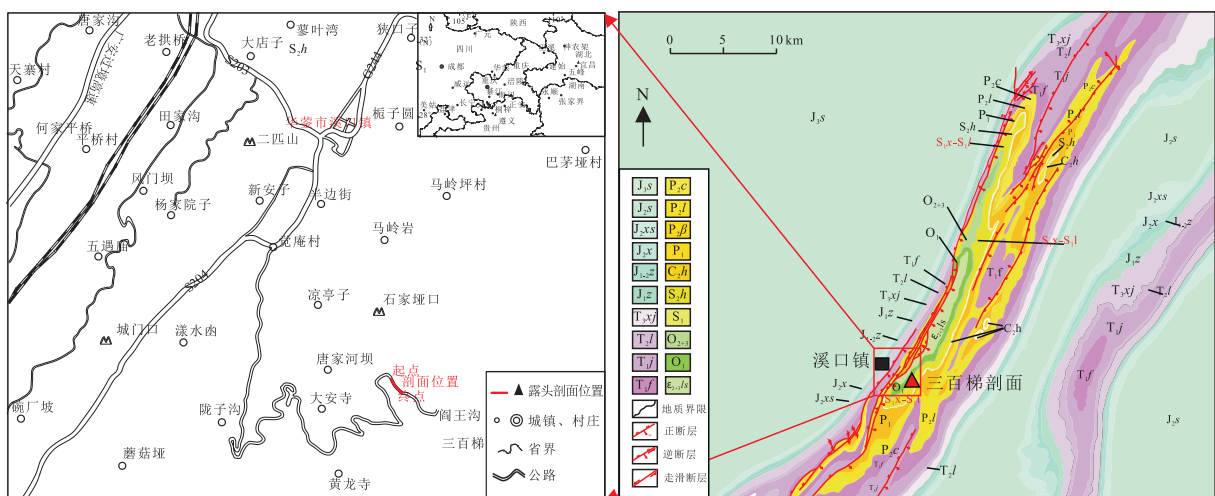


图1 四川盆地华蓥山剖面位置

Fig. 1 Location of stratigraphic section in Mount Huaying, Sichuan Basin

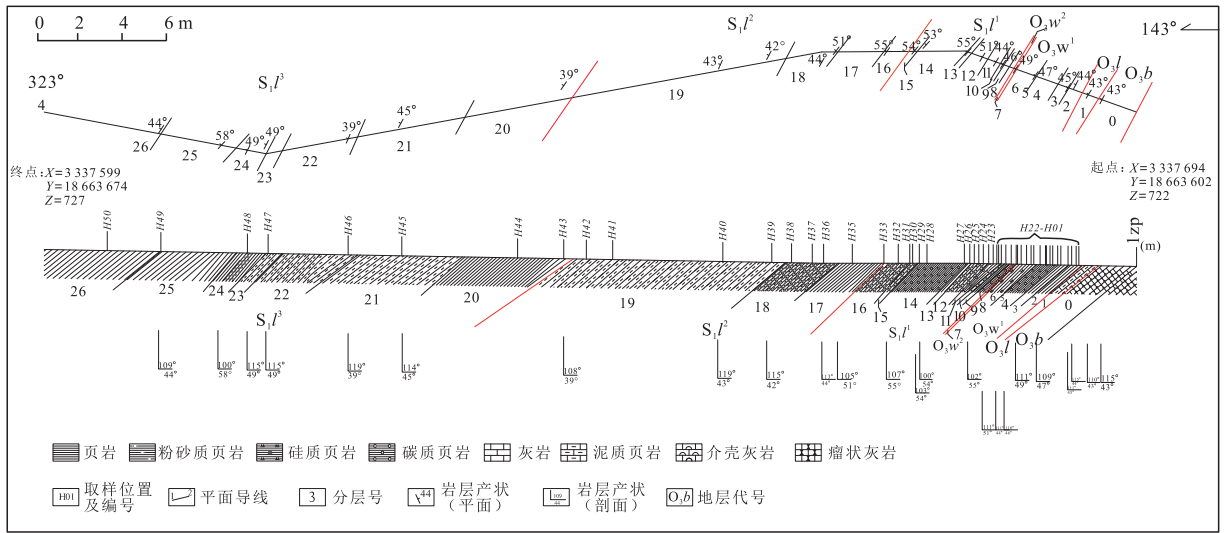
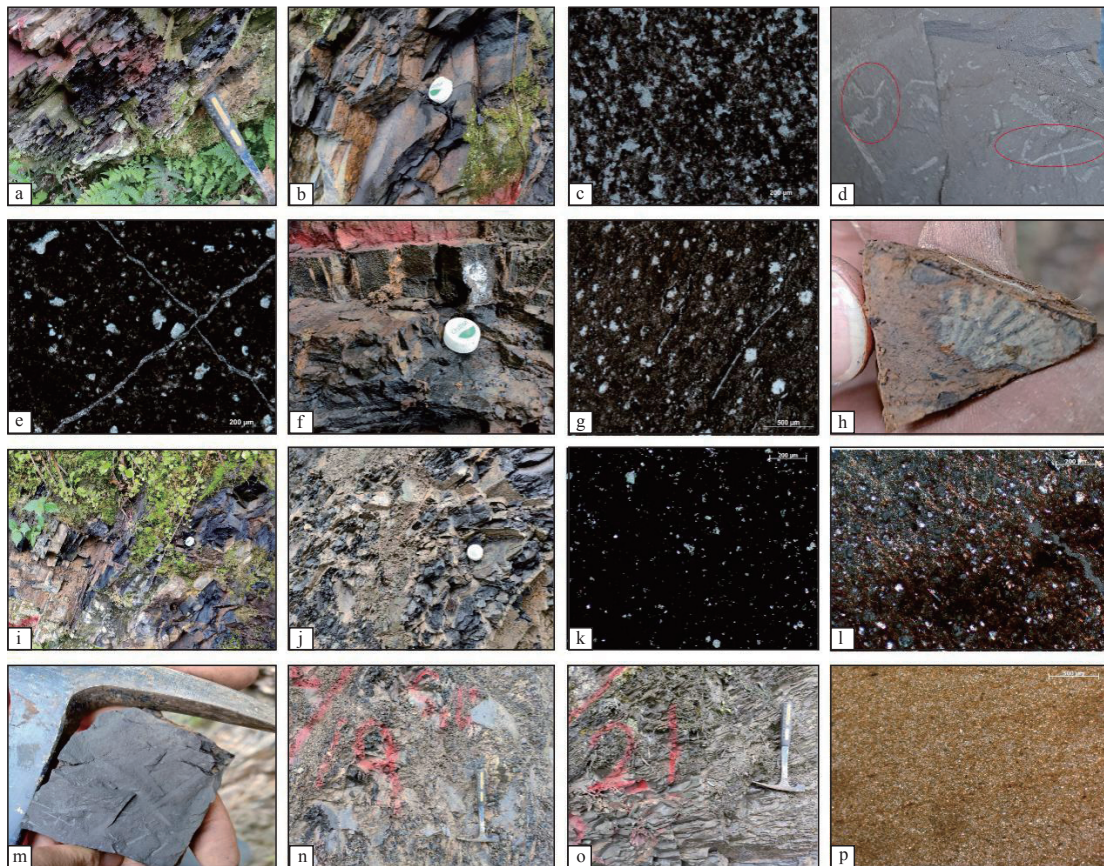


图2 四川盆地华蓥山五峰组—龙马溪组实测地层剖面

Fig. 2 Actual stratigraphic section of Wufeng-Longmaxi Formation in Mount Huaying, Sichuan Basin



注:a.五峰组层2,黑色页岩夹硅质页岩;b.五峰组层4,黑色硅质页岩;c.五峰组层5,灰黑色含硅页岩;d.五峰组层4,中发育大量笔石;e.五峰组层4,中发育构造微裂缝,硅质充填;f.观音桥段层7,黑色钙质硅质页岩;g.观音桥段层;h.观音桥段层7,中发育双壳类化石黑色介壳硅质页岩;i.龙一段层12,黑色碳质页岩、页理发育;j.龙一段层18,黑色含粉砂碳质页岩;k.龙一段层13,黑色碳质页岩;l.龙一段层14,灰黑色粉砂质页岩;m.龙一段层14,发育大量笔石;n.龙二段层19,灰黑色含粉砂碳质页岩;o.龙三段层21,灰绿色粉砂质泥岩;p.龙三段层23,灰绿色泥岩。

图3 五峰组—龙马溪组剖面岩石及化石特征

Fig. 3 Features of rocks and fossil of stratigraphic section of Wufeng-Longmaxi Formation

*abbreviatus*,在岩石薄片中可以观察到岩石发育大量构造微裂缝,并被硅质充填(图3e)。整体表现为深水陆棚相黏土质硅质页岩,页理发育,表现为静水沉积环境,有机质富集,硅质以生物成因的微晶石英为主。

五峰组二段(即观音桥段,层7):对应赫南特阶下部(445.16~444.43 Ma),灰色含介壳粉砂岩(图3f、图3g),顶界与龙马溪组呈整合接触,厚0.37 m,沉积速率0.5 m/Ma。硅质矿物含量90.2%,黏土矿物含量8.9%,碳酸盐矿物含量0.4%。见少量赫南特贝 *Hirnantia*。整体为深水陆棚相粉砂岩,硅质以石英粉砂为主,碳酸盐矿物含量低,反映受全球冰川作用的影响,水体相对较浅并受底流作用影响;赫南特贝零星可见,为异地搬运沉积特征(图3h)。观音桥段的岩性变化可能是微古地貌变化的沉积响应,不同区域观音桥段岩性及展布特征略有差异<sup>[8]</sup>,涪陵地区为灰黑色钙质硅质页岩、介壳硅质页岩,厚20~30 cm<sup>[9]</sup>,贵州地区为介壳灰岩与生物碎屑灰岩,厚7.4 m<sup>[10]</sup>。

龙马溪组根据岩性和笔石特征可划分3段:

龙一段(层8—层16):对应赫南特阶上部—埃隆阶下部(444.43~438.76±Ma),黑色碳质页岩夹粉砂质页岩,局部见2层斑脱岩。顶界与龙二段整合接触,厚9.23 m,沉积速率1.63 m/Ma。页理发育(图3i—图3l),由下至上颜色逐渐变浅。硅质矿物55.33%,黏土矿物41.78%,碳酸盐矿物0.55%。笔石大量富集(图3m),见雕刻雕笔石 *Persculptograptus persculptus* (Elles and Wood), 祖先祖笔石 *Avitograptus avitus* (Davies), 适度新双笔石 *Neodiplograptus modestus* (Lapworth), 曲背冠笔石 *Coronograptus cyphus* (Lapworth), 三角半耙笔石 *Demirastrites triangulatus* (Harkness), 盘旋喇叭笔石 *Lituiograptus convolutus* (Hisinger), 叶状花瓣笔石 *Petalolithus folium* (Hisinger), 规则锯笔石 *Pristiograptus regularis* (Tornquist), 赛式具刺单笔石 *Stimulograptus sedgwickii* (Portlock)。层8首现LM1,层11首现LM5,层14首现LM6,层15首现LM7,可作为区域上地层等时对比的依据。整体为深水陆棚相黏土质硅质页岩,有机质富集,为强还原静水环境,与邻区焦石坝、永川相比,龙一段厚度明显减薄,黏土矿物增加,硅质矿物减少,远源陆源碎屑注入具有一定影响。

龙二段(层17—层19):对应埃隆阶上部(438.76±~438.49 Ma)灰黑色—深灰色粉砂质页岩

(图3n),页理发育,粉砂含量增加,顶界与龙二段整合接触,厚度20.47 m,沉积速率74.81 m/Ma。硅质矿物43.87%,黏土矿物53.74%,碳酸盐矿物0.63%。风化严重,笔石偶见,见不规则假纹笔石 *Pseudoplegmograptus irregularis* Chen (sp. nov.)。整体为半深水陆棚相粉砂质页岩,由龙一段强还原色黑色变为氧化还原色灰色,粉砂颗粒增加,明显受陆源碎屑注入的影响,具有深水陆棚向浅水陆棚过渡特征。

龙三段(层20—层26):对应特列奇阶,灰色、灰绿色页岩、粉砂质页岩夹粉砂质条带(图3o、图3p),由于大量植被覆盖,未见顶,厚33.2 m。由下而上,颜色由灰色渐变为灰绿色,页岩页理逐渐减弱,黏土逐渐递增。硅质矿物40.3%,黏土矿物57.17%,碳酸盐矿物0.63%,笔石发育较少,见平坦扭口笔石 *Torquigraptus planus*。整体为浅水陆棚相粉砂质页岩,氧化色灰绿色出现,粉砂颗粒间歇性增加,陆源碎屑注入量增加,有机质明显降低,表现为充氧浅水特征。剖面自下而上描述见表1、图4。

### 3 剖面地化特征

根据50个剖面样品及76个XRF(X射线荧光)点测数据分析有机质丰度、成熟度、氧化还原环境、陆源碎屑注入等特征。

五峰组—龙一段 TOC 逐渐升高,为0.40%~11.45%,平均值3.71%。龙二段—龙三段 TOC 快速降低为0.11%~1.6%,平均值0.73%。热解峰温  $T_{max}$  用于判断成熟度,486~530 °C,平均值520 °C,属于过成熟阶段。

从各类地化指标来看,Th、U为氧化还原敏感元素,Zr/Al、Ti/Al越高,反映陆源碎屑注入量越大。富有机质页岩生物成因硅造成Si/Al较陆源成因硅偏高,Si<sub>bio</sub>(生物硅)偏高<sup>[11-12]</sup>。五峰组—龙一段总体Th/U<2,为强还原环境,Ti/Al、Zr/Al值较低,陆源注入量较少,Si/Al值相对较高,硅质来源具有生物成因特征,有机质较为富集。龙二段—龙三段Th/U值介于2~7,Ti/Al、Zr/Al值相对五峰组—龙一段逐渐增大,龙二段Si/Al值在五峰组—龙一段基值区摆动,龙三段Si/Al降至最低。由下至上反映了沉积环境由还原向氧化过渡的特征,生物硅质环境遭受破坏,陆源碎屑注入量增加,有机质丰度呈下降趋势(图5)。

表1 华蓥山三百梯剖面实测记录  
Table 1 Measured record of Sanbaiti section in Mount Huaying

层号	岩性及典型特征描述	层厚(m)
	龙马溪组( $S_1l$ )厚度62.1 m,未见顶	
26	灰绿色页岩,层理发育	8.08
25	浅灰色粉砂质页岩,局部见风化铁质结核	5.83
24	灰绿色粉砂质页岩与灰色粉砂岩互层,粉砂质页岩呈薄层状,层厚3~8 cm,粉砂岩多呈中层状	2.35
23	灰绿色薄—中层粉砂质页岩,单层厚5 mm,见球状风化	1.03
22	灰色粉砂质页岩,自下而上颜色由灰色变为浅灰色	4.28
21	灰绿色泥岩与深灰色粉砂质页岩互层,互层比1:1,层厚4 cm	6.40
20	深灰色页岩夹灰绿色薄层泥岩,从底至顶,粉砂含量逐渐增加	5.23
19	深灰色粉砂质页岩	13.12
18	深灰色粉砂质页岩	4.68
17	灰黑色页岩,富含笔石	2.94
16	薄—中层状黑色粉砂质页岩,偶夹黑色纹层	1.72
15	黑色中—薄层状粉砂质页岩	0.56
14	黑色薄层状碳质页岩夹粉砂质页岩薄层,纹层发育	3.11
13	黑色薄层状页岩,富含笔石,层厚3~4 cm	0.39
12	黑色中层含粉砂页岩,层厚4~5 cm	1.39
11	黑薄—中层碳质页岩	0.97
10	灰黑色含粉砂页岩,顶发育1层斑脱岩	0.29
9	黑色中厚层页岩,层厚5~20 cm,见球状风化,大小70 cm×15 cm	0.43
8	黑色碳质页岩,中层状层理,厚5~10 cm	0.37
	五峰组( $O_3w$ )厚度5.4 m	
7	灰色含介壳粉砂岩	0.22
6	中—厚层状硅质页岩,层厚12 cm,中层2~5 cm	1.59
5	斑脱岩	0.01
4	黑色薄—中层状碳质页岩,富含笔石,底部见擦痕,少量方解石充填	1.69
3	黑色中层状页岩,页理发育,层厚10 cm	0.84
2	黑色薄层状页岩,页理发育,发育少量笔石,该层发育4条斑脱岩。	1.05
	临湘组( $O_3l$ )厚度1.22 m	
1	灰色泥质灰岩	1.22
	宝塔组( $O_2b$ )厚度2.89 m	
0	浅灰色龟裂纹瘤状灰岩	2.89

## 4 剖面储层特征

### 4.1 储集空间类型

基于氩离子抛光扫描电镜观察,剖面富有机质页岩储集空间类型与井下样品一致,可归纳为有机孔、无机孔和微裂缝3大类。

富有机质页岩填隙状有机质较多见,其中普遍发育丰富的有机质纳米孔隙,为主要孔隙类型,其中以孔径几十纳米以下孔隙为主(图6a、图6b)。长石颗粒溶蚀孔洞与粒缘孔缝、黏土矿物伊利石层间孔

隙发育较好,见较显著的绿泥石与黄铁矿晶间孔,有一定连通性,为次要孔隙类型(图6c—图6f)。

### 4.2 孔隙结构

在低温氮气吸附曲线中,五峰组吸附量集中在低压区—中压区,当相对压力接近1,吸附量略有增加(图7a)。反映中孔( $0.028\ 08\ \text{cm}^3/\text{g}$ )及大孔( $0.004\ 90\ \text{cm}^3/\text{g}$ )为主,少量微孔( $0.001\ 69\ \text{cm}^3/\text{g}$ ) (图7b)。吸附回环为H2(b)与H3型的复合特征,对应细颈墨水瓶孔为主,少量狭缝形孔。

龙马溪组吸附量同样集中在低压区—中压区,

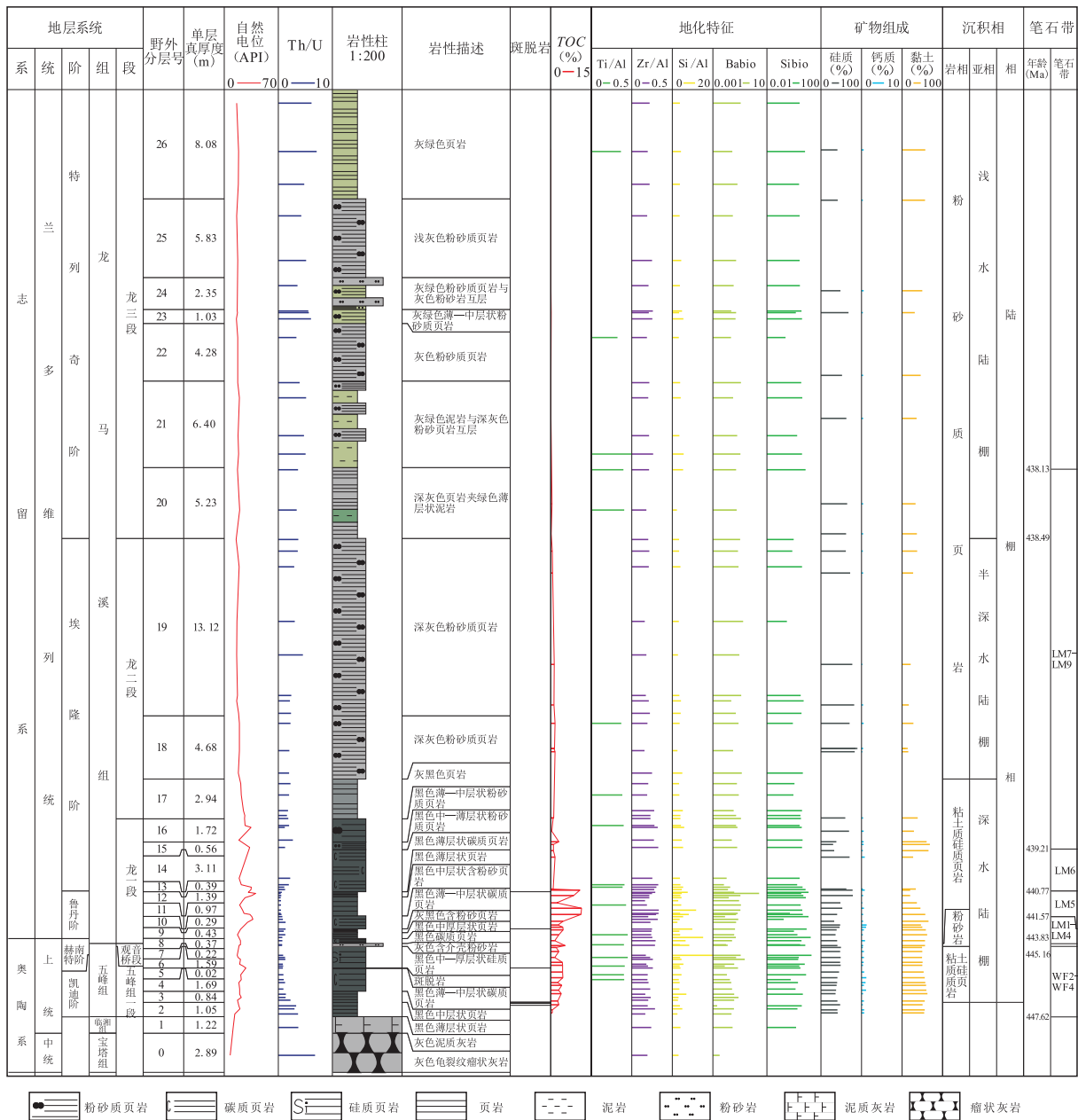


图4 四川盆地华蓥山溪口镇三百梯五峰组—龙马溪组剖面综合柱状

Fig. 4 Comprehensive column of Wufeng-Longmaxi Member of Sanbaiti section in Mount Huaying, Sichuan Basin

当相对压力接近1,吸附量略有增加(图7c)。反映微孔(0.001 4 cm<sup>3</sup>/g)及中孔(0.018 97 cm<sup>3</sup>/g)为主,大孔少量(0.001 93 cm<sup>3</sup>/g)(图7d)。吸附回环为H2(b)H4型,对应墨水瓶孔为主,少量狭缝形孔。

## 5 讨论

大量勘探开发实践表明,五峰组—龙马溪组页

岩气富集高产区通常为厚度大的深水陆棚相,装饰叉笔石 *Dicellograptus ornatus* 带至三角半耙笔石 *Demirastrites triangulatus* 带(WF2—LM6笔石带),并且该段页岩储层品质好,具有沉积速率低、有机质类型好、TOC含量高、脆性好等特点<sup>[13]</sup>。因此,利用华蓥山剖面的基础数据结合区域资料对比研究,从富有机质页岩厚度及储层品质两方面探讨对下一步勘探的启示。

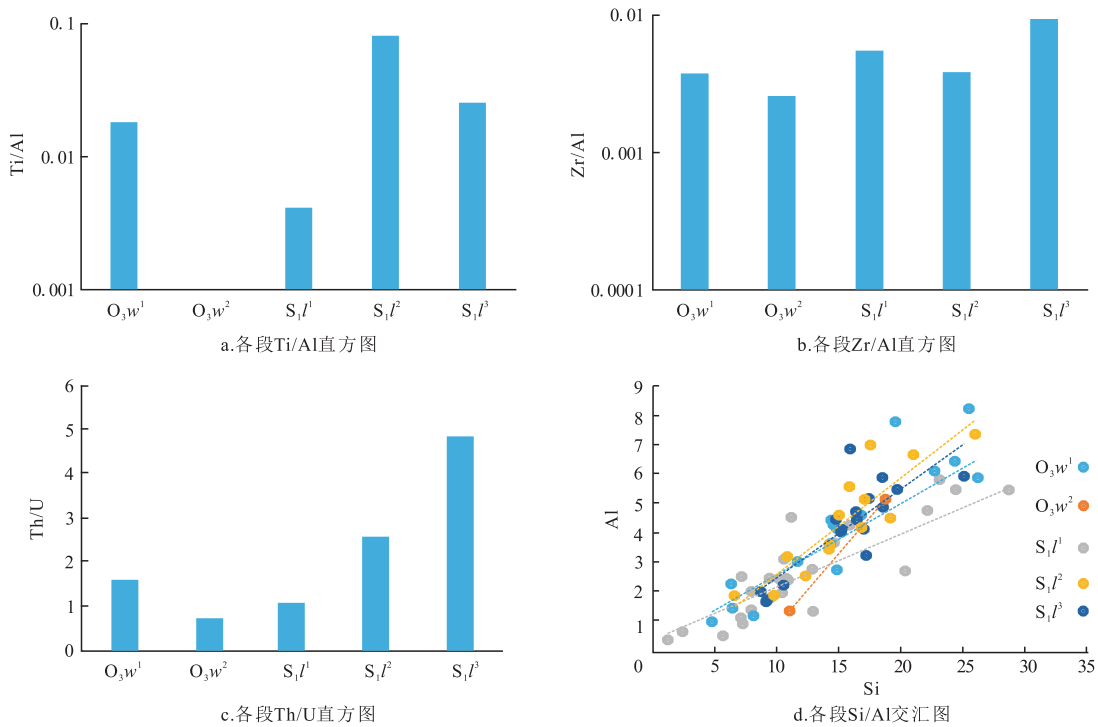
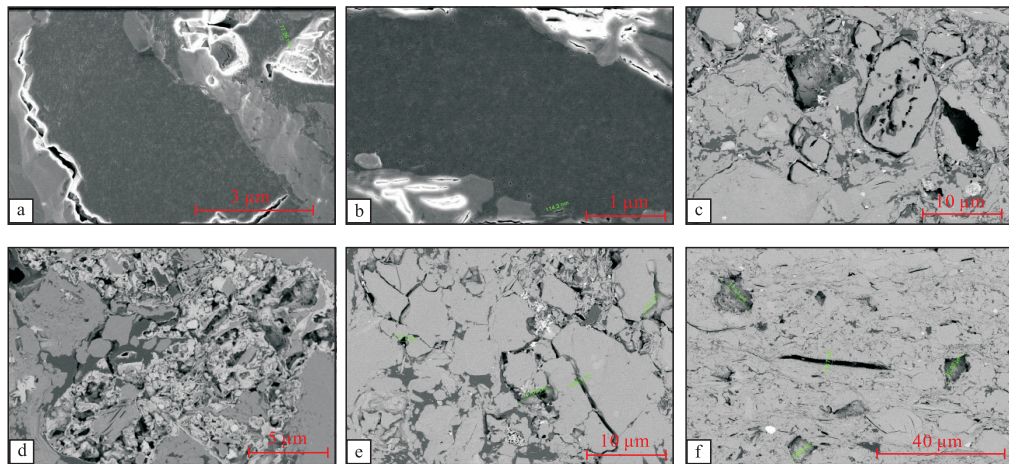


图5 地化特征统计参数

Fig. 5 Statistical parameters of geochemical features



注:a.有机质孔,小而密,孔径约80 nm以下( $S_{1l}$ ,层9);b.有机质孔发育丰富,孔径约115 nm以下( $O_{3w}$ ,层3);c.长石颗粒内溶孔和粒缘溶缝,见溶蚀完全后印模孔( $S_{1l}$ ,层9);d.绿泥石和黄铁矿集合体溶孔( $S_{1l}$ ,层9);e.碎裂缝,粒间孔连通性好( $S_{1l}$ ,层9);f.溶洞发育,见黏土矿物层间孔( $O_{3w}$ ,层3)。

图6 四川盆地华蓥山页岩发育的孔隙类型

Fig. 6 Pores with developed shale in Mount Huaying, Sichuan Basin

### 5.1 古地貌影响富有机质页岩沉积厚度

以笔石带作为地层时间刻度标尺,WF2-LM6笔石带为有机质页岩气富集有利层位<sup>[14-15]</sup>,可作为一套目标层系,区域上可据此进行储层对比,优选有利勘探区。

五峰组—龙马溪组沉积期微古地貌特征是影响页岩地化指标和储层各项基本参数的根本原因。通常根据观音桥段的岩性、厚度、笔石带等刻画微古地貌<sup>[16]</sup>。对比华蓥山与威远、永川、焦石坝笔石带WF2-LM6的厚度变化及观音桥段的岩性变化,分析华蓥山地区古地貌特征。

近期勘探成果表明, WY1井 WF3-WF4 缺失, WF2 LM1-LM6 厚度仅为 12.91 m; WY11井 WF2-LM6 笔石带发育齐全厚度为 18.48 m, 优质储层厚度明显增加, 产能大于 WY1 井。华蓥山剖面尽管 WF2-LM9 笔石带发育齐全, 但 WF2-LM6 页岩厚度较薄(12.21 m), 相比永川地区 YY1 井 WF2-LM6 厚 44.24 m, 涪陵地区 JY1 井 WF2-LM6 厚 67.83 m, 华蓥山剖面厚度明显较薄(图 8)。

观音桥段的岩性变化通常是微古地貌变化的沉积响应<sup>[16]</sup>。涪陵地区观音桥段为钙质硅质页岩、硅质钙质页岩、永川地区、威远地区观音桥段为介壳灰岩。而华蓥山地区较为特殊, 观音桥段为含介壳粉砂岩, 粉砂含量较高, Th/U 为 0.84, Zr/Al 为 0.009, 反映了强还原、陆源碎屑注入较少深水环境。观音桥段上下相邻层发现大量笔石定向排列反映了底流作用的影响。

因此, 综合 WF2-LM6 厚度减薄及观音桥段岩性变化的特征认为华蓥山地区存在水下高地, 受底流作用较强, 影响了优质页岩沉积厚度, 物质基础略差。从该剖面的古地貌分析结果来看, 尽管区域上

川南地区均位于深水陆棚相带, 但局部微古地貌对于页岩气形成的物质基础具有重要的影响。因此, 微古地貌刻画为下一步龙马溪组勘探提供思路。

## 5.2 火山作用、物源供给、还原环境共同控制页岩储层品质

笔石带标定地层具有年代学意义, 可以反映等时地层格架下的沉积演化。WF2-LM6 认为是川南五峰组—龙马溪组优质页岩发育期。因此, 对比华蓥山剖面纵向上笔石带 WF2-LM6 与 LM7-LM9 (剖面顶) 的地化、矿物、储层参数等, 发现 WF2-LM6 对应斑脱岩发育密集段, TOC 为 0.55%~11.54%, 平均值 3.94%, Th/U 为 0.46~3.67, 平均值 1.17, Zr/Al 为 0.003~0.008, 平均值为 0.005, Si/Al 为 2.48~22.47, 平均值为 5.5, Ti/Al 为 0~0.053, 平均值为 0.008。LM7-LM9 未见斑脱岩, TOC 为 0.21%~2.99%, 平均值为 1.12%, Th/U 为 0.46~3.67, 平均值为 3.48, Zr/Al 为 0~0.029, 平均值为 0.007, Si/Al 为 2.51~5.83 平均值为 4.11, Ti/Al 为 0~0.061 8, 平均值为 0.032。二者比较, WF2-LM6 地化指标 Th/U 小于 2, Ti/Al、Zr/Al 值

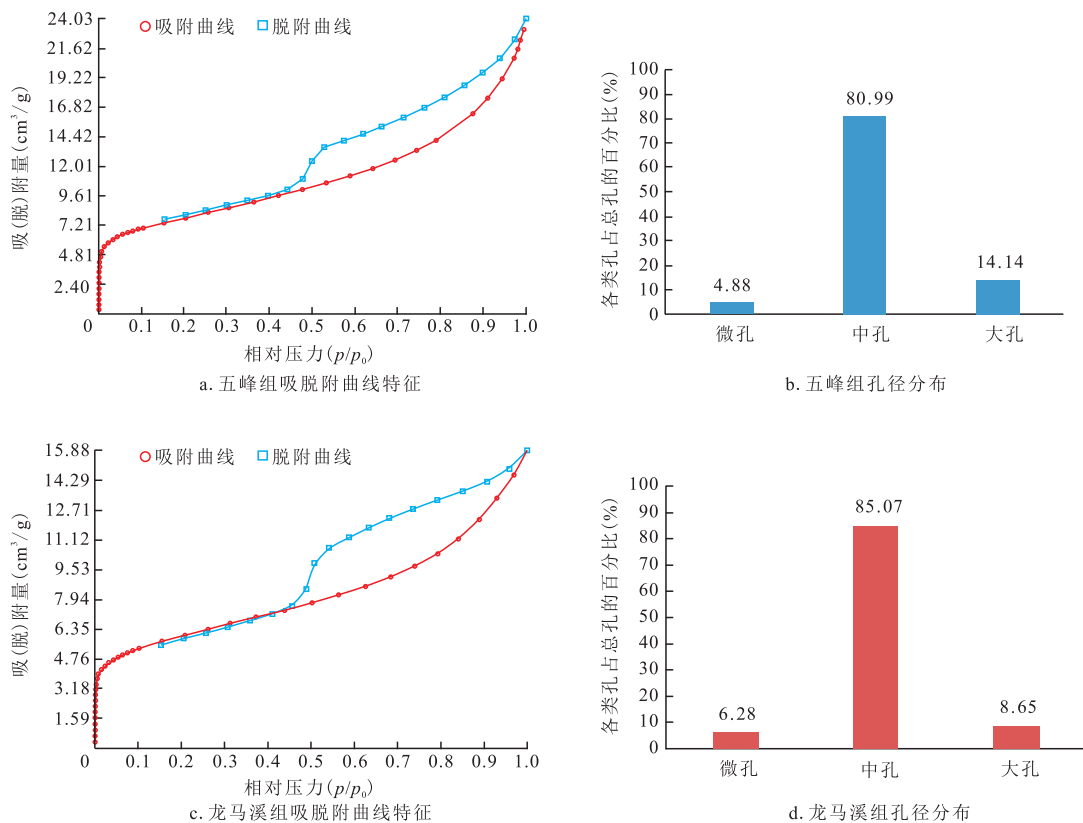


图7 五峰组—龙马溪组吸附脱附曲线特征及孔径分布

Fig. 7 Characteristics of adsorption-desorption curve and pore size distribution of Wufeng-Longmaxi Formation

较低,  $Ba_{bio}$ 、 $Si_{bio}$ 、 $Si/Al$  值相对较高,反映为强还原环境,陆源注入量较少,硅质矿物具有生物成因特征,有机质较为富集(表2),储集空间以中孔为主,大孔、微孔发育。邻井华地1井WF2-LM6的  $Ba_{bio}$  等参数也不断升高,反映华蓥山地区高古生产力的特征。综合分析认为火山灰与上升流为海水提供了丰富的营养物质,同时广泛分布可对比的火山灰隔绝阳光及氧气,形成强还原环境,造成大量生物死亡并落入海底增加有机质埋藏,同时低沉积速率(1.63~2.11 m/Ma)凝缩沉积易于形成高TOC、高脆性的优质页岩储层。

## 6 结论

1) 华蓥山剖面出露良好,五峰组至龙马溪组底部页岩地层齐全,五峰组分为2段,龙马溪组(未见

顶)分为3段,WF2-LM9笔石带发育齐全,由下至上反映了沉积环境由还原向氧化过渡的特征,生物硅质环境遭受破坏,陆源碎屑注入量增加,有机质丰度呈下降趋势。五峰组—龙一段有机质较为富集,脆性矿物含量高,储集空间以中孔为主,大孔、微孔发育,孔隙结构以墨水瓶孔为主,少量狭缝形孔。

2) 华蓥山剖面WF2-LM6笔石带对应的优质页岩段厚度较永川、涪陵地区明显减薄,观音桥段岩性与其它地区不同,为含介壳粉砂岩。综合反映该地区沉积时位于局部微古地貌高地,受底流作用影响,粉砂质含量较高。因此,微古地貌对于页岩气形成的物质基础具有重要的影响,可为下一步龙马溪组选区评价提供思路。

3) 华蓥山剖面五峰组—龙一段富有机质页岩储层厚度主要受控于微古地貌特征,储层品质主要受火山作用、物源供给、沉积环境共同作用。

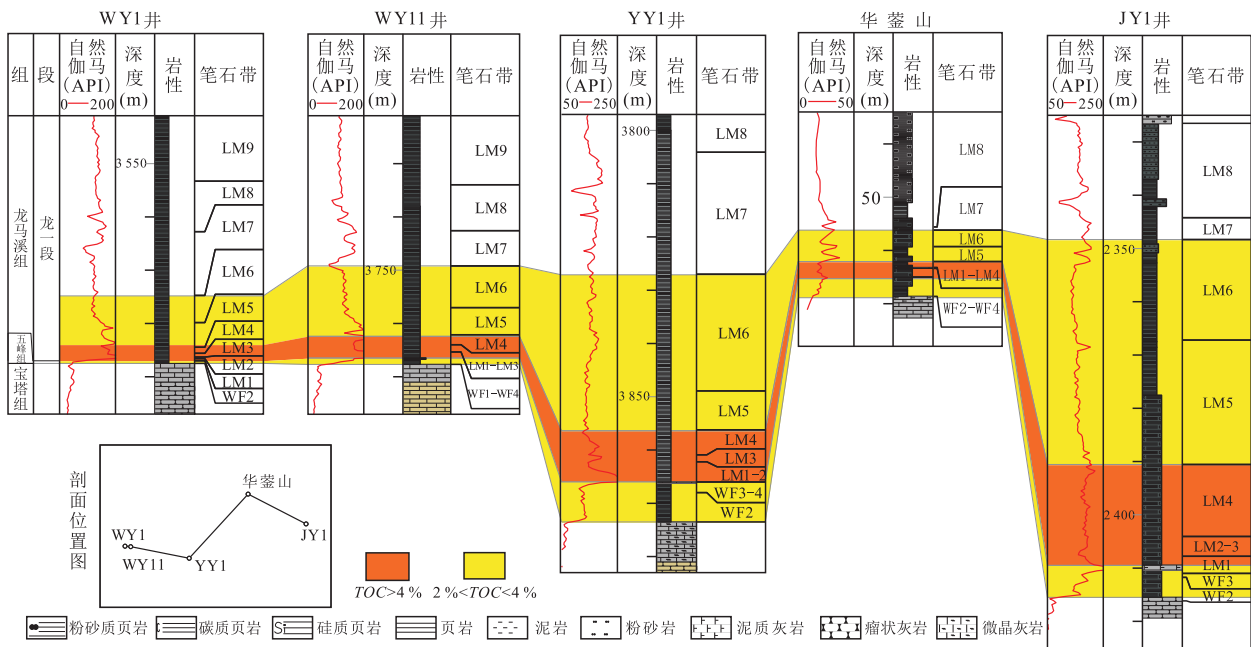


图8 川南地区笔石带连井对比

Fig. 8 Comparison of graptolite biozone cross wells in southern Sichuan

表2 四川盆地华蓥山剖面WF2-LM6与LM7-LM9(剖面顶)地化、储层参数对比

Table 2 Comparison of geochemical and reservoir parameters between section WF2-LM6 and section LM7-LM9 (top) in Mount Huaying, Sichuan Basin

剖面	Th/U	TOC(%)	$Si_{bio}$ (%)	$Ba_{bio}$ (%)	Zr/Al	Si/Al	Ti/Al
LM7-LM9剖面顶	3.477	0.836	3.029	0.068	0.007	4.113	0.032
WF2-LM6	1.173	3.937	4.982	0.115	0.005	5.5	0.008

参考文献

- [1] 马永生,蔡勋育,赵培荣.中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J].石油勘探与开发,2018,45(4):561-574.  
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45 (4): 561-574.
- [2] 邹才能,赵群,董大忠,等.页岩气基本特征、主要挑战与未来前景[J].天然气地球科学,2017,28(12):1781-1796.  
ZOU Caineng, ZHAO Qun, DONG Dazhong, et al. Geological characteristics, main challenges and future prospect of shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(12): 1781-1796.
- [3] 郭彤楼.中国式页岩气关键地质问题与成藏富集主控因素[J].石油勘探与开发,2016,43(3):317-326.  
GUO Tonglou. Key geological issues and main controls on accumulation and enrichment of Chinese shale gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43 (3): 317-326.
- [4] 何江林,王剑,余谦,等.外源补给型页岩气的发现及油气地质意义[J].石油学报,2018,39(1):12-22.  
HE Jianglin, WANG Jian, YU Qian, et al. Discovery of exogenous type shale gas and its geological significance to hydrocarbon exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(1): 12-22.
- [5] 陈旭,樊隽轩,王文卉,等.黔渝地区志留系龙马溪组黑色笔石页岩的阶段性渐进展布模式[J].中国科学,2017,47(6):720-732.  
CHEN Xu, FAN Juanxuan, WANG Wenhui, et al. Stage-progressive distribution pattern of the Lungmachi black graptolitic shales from Guizhou to Chongqing, Central China[J]. Scientia Sinica(Terrae), 2017, 47(6): 720-732.
- [6] 梁峰.中上扬子地区五峰组—龙马溪组页岩气富集模式及有利区优选评价[D].徐州:中国矿业大学,2018.  
LIANG Feng. The research on shale gas enrichment pattern and the favorable area optimizing of Wufeng-Longmaxi shale in middle and upper[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [7] 方少仙,侯方浩,李凌,等.四川华蓥山以西石炭系黄龙组沉积环境的再认识[J].海相油气地质,2000,5(1-2):158-166.  
FANG Shaoxian, HOU Fanghao, LI Ling, et al. Understanding of Carboniferous Huanglong Formation sedimentary environment in the west of Huaying Mountain, Sichuan Province[J]. Marine Petroleum Geology Origin, 2000, 5(1-2): 158-166.
- [8] 杜伟,胡宗全,刘光祥,等.四川盆地及周缘上奥陶统五峰组岩相特征[J].石油实验地质,2020,42(3):398-404.  
DU Wei, HU Zongquan, LIU Guangxiang, et al. Lithofacies of Upper Ordovician Wufeng Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42 (3): 398-404.
- [9] 张柏桥,孟志勇,刘莉,等.四川盆地涪陵地区五峰组观音桥段成因分析及其对页岩气开发的意义[J].石油实验地质,2018,40(1):30-37.  
ZHANG Boqiao, MENG Zhiyong, LIU Li, et al. Significance of shale gas genesis to the development of Guanyinqiao Member, Wufeng Formation, Fuling area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(1): 30-37.
- [10] 邓义楠,王约,陈洪德,等.黔北桐梓五峰组观音桥段双壳类和腹足类的生态意义[J].地层学杂志,2010,34(3):328-333.  
DENG Yinan, WANG Yue, CHEN Hongde, et al. Bivalves and gastropods from the Ordovician Guanyinqiao member of the Wufeng formation in Tongzi, Guizhou, south China, and their ecological significance[J]. Journal of Stratigraphy, 2010, 34(3): 328-333.
- [11] 葛祥英.四川盆地东部奥陶—志留纪交替时期事件沉积与有机质富集[D].北京:中国地质大学,2020.  
GE Xiangying. The events across the Ordovician-Silurian transition and the organic enrichment of black shales in the east of Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.
- [12] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, LYONS T. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update[J]. Chemistry Geology, 2006, 232(1-2): 12-32.
- [13] 梁峰,王红岩,拜文华,等.川南地区五峰组—龙马溪组页岩笔石带对比及沉积特征[J].天然气工业,2017,37(7):20-26.  
LIANG Feng, WANG Hongyan, BAI Wenhua, et al. Graptolite correlation and sedimentary characteristics of Wufeng-Longmaxi shale in southern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(7): 20-26.
- [14] 聂海宽,金之钧,马鑫,等.四川盆地及邻区上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组底部笔石带及沉积特征[J].石油学报,2017,38(2):160-174.  
NIE Haikuan, JIN Zhijun, MA Xin, et al. Graptolites zone and sedimentary characteristics of Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38 (2): 160-174.
- [15] 陈旭,樊隽轩,张元动,等.五峰组及龙马溪组黑色页岩在扬子覆盖区内的划分与圈定[J].地层学杂志,2015,39(4):351-358.  
CHEN Xu, FAN Junxuan, ZHANG Yuandong, et al. Subdivision and delineation of the Wufeng and Lungmachi black shales in the subsurface areas of the Yangtze Platform[J]. Journal of Stratigraphy, 2015, 39(4): 351-358.
- [16] 王同,张克银,熊亮,等.四川自贡地区五峰组—龙马溪组下段古地貌刻画及其油气意义[J].石油实验地质,2018,40(6):764-770.  
WANG Tong, ZHANG Keyin, XIONG Liang, et al. Paleogeomorphology restoration of Wufeng Formation-Lower Member of Longmaxi Formation in Zigong area of Sichuan Province and its oil and gas significance[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(6): 764-770.

(编辑 常燕)