

引用格式:何希鹏,高玉巧,马军,等.重庆市武隆区黄莺乡五峰组—龙马溪组剖面沉积特征及地质意义[J].油气藏评价与开发,2022,12(1):95-106.

HE Xipeng, GAO Yuqiao, MA Jun, et al. Sedimentary characteristics and geological significance of outcrop in Wufeng-Longmaxi Formation, Huangying Town, Wulong District, Chongqing[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(1): 95-106.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2022.01.008

重庆市武隆区黄莺乡五峰组—龙马溪组剖面沉积特征及地质意义

何希鹏,高玉巧,马军,张培先,何贵松,周頔娜,刘娜娜,孙斌

(中国石化华东油气分公司,江苏南京 210019)

摘要:五峰组—龙马溪组海相优质页岩是目前国内唯一实现页岩气商业开采的页岩层。以重庆武隆地区黄莺乡剖面为例,通过野外观察和实测,结合室内实验分析,研究海相优质页岩地层、沉积、地化等特征及其相互关系。结果表明:①黄莺乡剖面自下而上出露五峰组黑色硅质页岩、观音桥段深灰色介壳泥质灰岩、龙马溪组黑色页岩,整体反映由深水陆棚到闭塞浅海再到深水陆棚的沉积环境;②出露地层生物地层连续完整,可识别出凯迪阶—鲁丹阶WF2—LM5笔石带,笔石种类、含量、保存特征等与沉积环境密切相关;③武隆地区处于深水陆棚成烃中心,优质页岩厚度大,静态指标优越,页岩生烃强度大,具备良好的页岩气富集物质基础;④武隆地区①—④小层的页岩气成藏条件和富集条件较好,是页岩气勘探开发甜点段。

关键词:优质页岩;沉积环境;页岩气;五峰组—龙马溪组;武隆黄莺乡剖面

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Sedimentary characteristics and geological significance of outcrop in Wufeng-Longmaxi Formation, Huangying Town, Wulong District, Chongqing

HE Xipeng, GAO Yuqiao, MA Jun, ZHANG Peixian, HE Guisong, ZHOU Dina, LIU Nana, SUN Bin

(Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: At present, the Wufeng-Longmaxi Marine high quality shale is the only case that has been commercially exploited in China. Taking Huangying section in Wulong District, Chongqing as an example, the characteristics of sedimentary geochemistry and their interrelationship of Marine high quality shale are studied by the field observation and field measurement combined with laboratory experiment analysis. The results show that: firstly, the black siliceous shales of Wufeng Formation and dark gray shell argillaceous limestone of Guanyinqiao Formation are exposed from bottom to top in Huangying section, which reflects the sedimentary environment from deep water shelf to shallow sea and then to deep water shelf. Secondly, the biostratigraphy of outcrop layer is continuous and intact, and the Kaidian-Rudan WF2-LM5 graptolite zone can be recognized. The graptolite type, content and preservation characteristics are closely related to the sedimentary environment. Thirdly, the Wulong area is located in the hydrocarbon generation center of the deepwater shelf. The high-quality shale has large thickness, superior static index, high hydrocarbon generation intensity and good material basis for shale gas enrichment. Fourthly, Wulong area is the sweet spot of both shale gas exploration and development because of the good accumulation and enrichment conditions of shale gas in small layer ①—④.

Keywords: high quality shale; sedimentary environment; shale gas; Longmaxi-Wufeng Formation; Huangying section of Wulong

收稿日期:2021-10-10。

第一作者简介:何希鹏(1970—),男,硕士,研究员,本刊第二届编委会委员,主要从事油气地质及勘探评价等方面的研究工作。地址:江苏省南京市建邺区江东中路375号金融城9号楼,邮政编码:210019。E-mail: hexp.hdsj@sinopec.com

基金项目:中国石化科技项目“四川复杂构造带页岩气勘探开发关键技术”(P19017-3);中国石化科技项目“华东探区天然气富集规律与目标评价”(P20059-6)。

四川盆地内的涪陵、威远、长宁、昭通、威荣、永川等地区上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组黑色页岩因其静态指标优越、埋藏深度适中、富集条件有利和大型水力压裂等工程工艺技术适应性好,实现了我国南方海相页岩气大规模商业开发,促进了我国页岩气产业的快速发展,有力支撑了我国天然气供给和绿色低碳能源转型^[1-9]。四川盆地外的武隆地区由于受多期复杂的构造活动影响,页岩气资源禀赋较差,单井产能较低^[10-15],尚处于勘探评价阶段,目前实施的少量页岩气探井难以揭示该区页岩气成藏特征及富集高产规律,补充一批典型的露头剖面,对控制页岩的沉积演化、储层特征及静态参数展布规律具有重要意义。

基于重庆市武隆区黄莺乡剖面观察和实测,对黄莺乡剖面五峰组—龙马溪组底部岩性、地层、古生物、沉积等特征进行研究,划分黄莺乡剖面地层序列和沉积环境。通过剖面连续取样,开展薄片、地化、物性、矿物组成、孔隙微观结构、微量元素等测试分析,研究页岩静态指标与沉积环境的关系,建立沉积

环境演化模式,明确沉积环境对页岩品质的控制作用,以期为四川盆地外残留向斜五峰组—龙马溪组页岩气勘探开发提供参考。

1 地质背景

黄莺乡剖面位于重庆市武隆区黄莺乡双河村(建设西路S203道旁),构造位置处于利川—武隆复向斜武隆向斜团堡次凹南翼。武隆向斜位于四川盆地与雪峰隆起西缘之间的“槽—档”过渡带,核部平缓而开阔,两翼地层倾角变陡,约为 $25^{\circ} \sim 35^{\circ}$,北翼倾角陡于南翼,呈不对称向斜,轴面倾向北西,走向呈近东西向(图1),面积约为 $1\ 200\text{ km}^2$ 。向斜核部出露地层以侏罗系—三叠系为主,由南向北依次出露二叠系、志留系、奥陶系、寒武系。上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组为该区页岩气勘探主要目的层,五峰组厚度介于 $5 \sim 9\text{ m}$,岩性以黑色页岩为主;龙马溪组厚度介于 $400 \sim 450\text{ m}$,上部为黄灰色、深灰色、灰黑色泥质粉砂岩、粉砂质页岩、页岩,

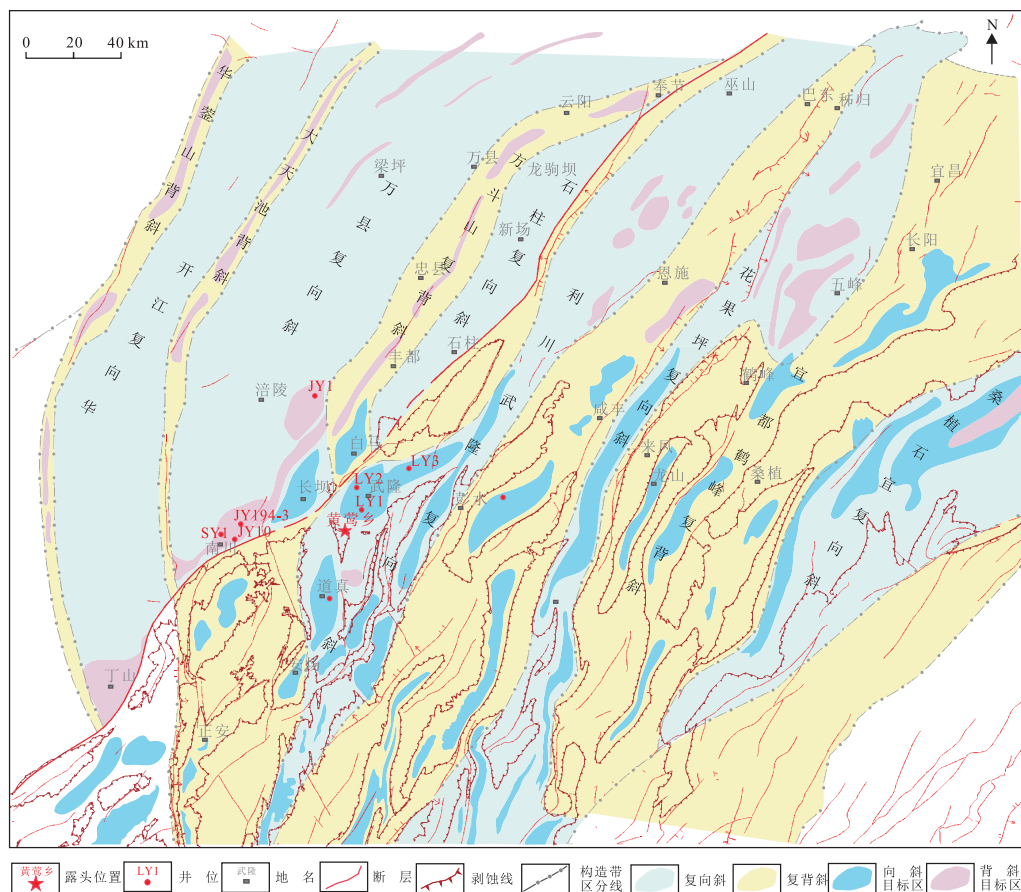


图1 渝东南地区构造分布

Fig. 1 Tectonic distribution in southeastern Chongqing

中部为深灰色、灰黑色泥质粉砂岩,下部为灰黑色、黑色页岩。

2 地层发育特征

黄莺乡剖面出露地层从底到顶依次为上奥陶统临湘组(未见底)、五峰组、下志留统龙马溪组一段(未见顶)地层。重点研究层位地层出露完好,临湘组与五峰组、观音桥段与龙马溪组界线可清晰识别。地层产状 340° 至 350° ∠ 27° ~ 30° ,测量厚度为60 m,真厚度为32.7 m(图2)。整体构造简单,层理、节理、高角度裂缝发育,五峰组—龙马溪组发育典型的黑色笔石页岩和深灰色介壳泥质灰岩,页岩段笔石丰富,介壳泥质灰岩段见典型的赫南特贝,并可观察到灰色—灰白色斑脱岩,与黑色页岩互层(图3)。

2.1 地层界线

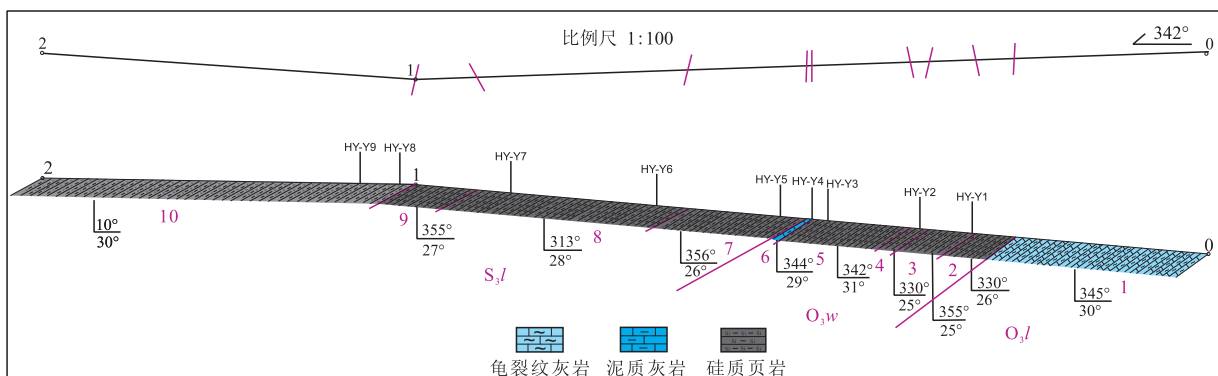
剖面底部为上奥陶统临湘组灰色瘤状灰岩,与五峰组呈整合接触,接触面发育1 cm厚的灰白色斑脱岩(图3a)。五峰组与上覆下志留统龙马溪组为连续沉积,整合接触,两者以五峰组顶部沉积的一套厚度为0.32 m的观音桥段深灰色介壳泥质灰岩为界线(图3b),其上为龙马溪组,其下为五峰组。这一界线在四川盆地及周缘地区的钻井岩心上也能观察到。

2.2 地层特征

在黄莺乡剖面岩性、层理构造、裂缝、生物化石等特征详细描述的基础上,利用手持伽马仪开展了伽马数据采集,对剖面密集采样,开展系统分析测试工作,依据获取的地层描述、自然伽马、分析测试等



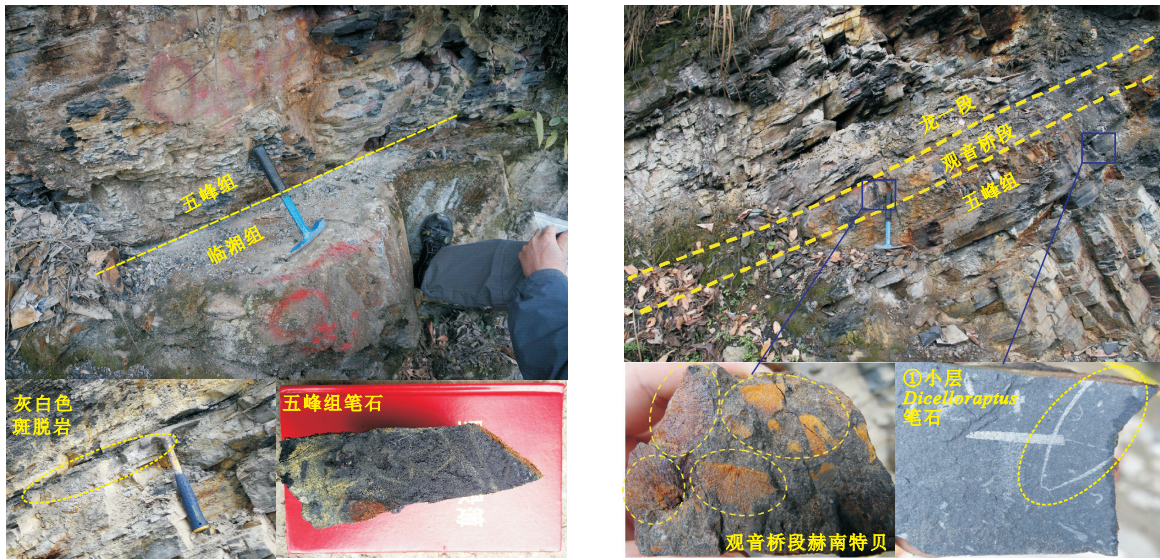
a.重庆市武隆区黄莺乡五峰组—龙马溪组剖面实景



b.重庆市武隆区黄莺乡五峰组—龙马溪组实测地质剖面

图2 重庆市武隆区黄莺乡五峰组—龙马溪组剖面

Fig. 2 Outcrop of Wufeng-Longmaxi Formation in Huangying Town



a. 临湘组—五峰组界线及五峰组斑脱岩

b. 五峰组—龙马溪组界线及典型化石

图3 重庆市武隆区黄莺乡剖面地层界线

Fig. 3 Stratigraphic boundary of Huangying section, Wulong, Chongqing

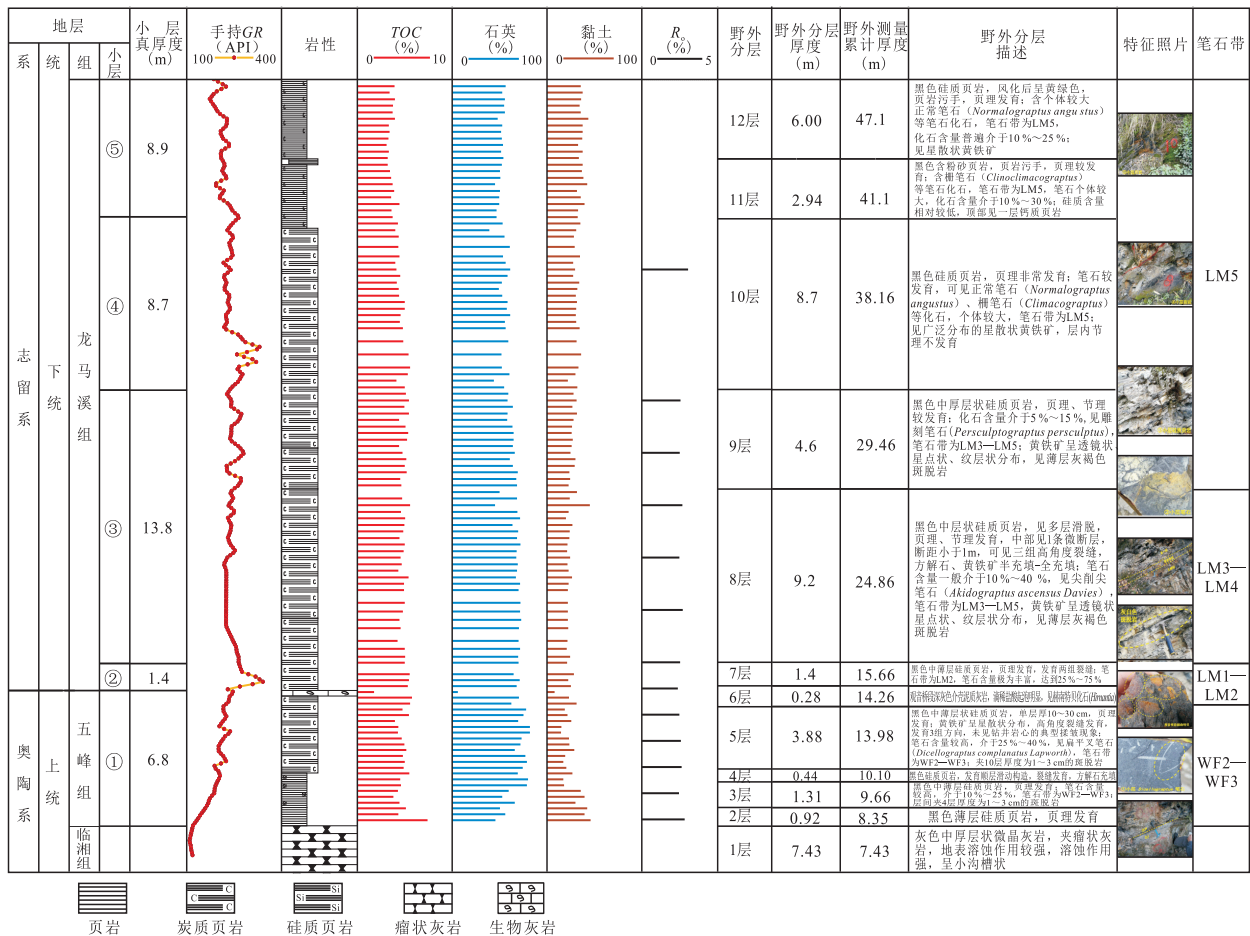


图4 重庆市武隆区黄莺乡剖面五峰组—龙马溪组实测综合柱状图

Fig. 4 Comprehensive histogram of Wufeng—Longmaxi Formation in Huangying section, Wulong, Chongqing

资料,开展了黄莺乡剖面精细地层划分(图4),自上而下描述如下。

龙马溪组一段(未见顶)

12层:黑色硅质页岩,风化后呈黄绿色,页岩污手,页理发育;含个体较大正常笔石(*Normalograptus angustus*)等笔石化石,笔石带为LM5,化石含量普遍介于10%~25%;见星散状黄铁矿。 厚6 m

11层:黑色含粉砂页岩,页岩污手,页理较发育;含栅笔石(*Clinoclimacograptus*)等笔石化石,笔石带为LM5,笔石个体较大,化石含量介于10%~30%;硅质含量相对较低,顶部见一层钙质页岩;系鲁丹阶海侵晚期沉积物,海平面开始下降,水体逐渐变浅,但总体仍处于深水陆棚亚相沉积环境。 厚2.9 m

10层:黑色硅质页岩,页理非常发育;笔石较发育,可见正常笔石(*Normalograptus angustus*)、栅笔石(*Clinoclimacograptus*)等化石,个体较大,笔石带为LM5;见广泛分布的星散状黄铁矿,层内节理不发育。为鲁丹阶海侵中期沉积物,处于深水陆棚亚相。 厚8.7 m

9层:黑色中厚层状硅质页岩,页理、节理较发育;化石含量介于5%~15%,见雕刻笔石(*Persculptograptus persculptus*),笔石带为LM3—LM5;黄铁矿呈透镜状、星点状、纹层状分布,见薄层灰褐色斑脱岩。 厚4.6 m

8层:黑色中层状硅质页岩,见多层滑脱,页理、节理发育,中部见1条微断层,断距小于1 m,可见三组高角度裂缝,方解石、黄铁矿半充填—全充填;笔石含量一般介于10%~40%,见尖笔石(*Akidograptus ascensus*),笔石带为LM3—LM5;黄铁矿呈透镜状、星点状、纹层状分布,见薄层灰褐色斑脱岩;为冰川期后鲁丹阶海侵早期沉积物,处于深水陆棚亚相。 厚9.2 m

7层:黑色中薄层硅质页岩,页理发育,发育两组裂缝;见雕刻笔石(*Persculptograptus persculptus*),笔石带为LM1—LM2,笔石含量极为丰富,达到25%~75%,表明经历奥陶纪末赫南特期短暂冰川作用后,笔石开始爆发式复苏并加速演变;局部见硅质结核,黄铁矿呈星散状分布。 厚1.4 m

—————整合—————

五峰组

6层:观音桥段深灰色介壳泥质灰岩,滴稀盐酸起泡明显,见赫南特贝化石(*Hirnantia*)。 厚0.32 m

5层:黑色中薄层状硅质页岩,单层厚度为10~

30 cm,页理发育;黄铁矿呈星散状分布,高角度裂缝发育,发育3组方向,未见钻井岩心的典型揉皱现象;笔石含量较高,介于25%~40%,见扁平叉笔石(*Dicellograptus complanatus* Lapworth),该层笔石带为WF2—WF3;夹10层厚度为1~3 cm的斑脱岩。

厚3.88 m

4层:黑色硅质页岩,发育顺层滑动构造,裂缝发育,以低角度缝为主,方解石充填。 厚0.44 m

3层:黑色中薄层硅质页岩,页理发育;笔石含量较高,介于10%~25%,见扁平叉笔石(*Dicellograptus complanatus* Lapworth),笔石带为WF2—WF3;层间夹4层厚度为1~3 cm的斑脱岩。

厚1.31 m

2层:黑色薄层硅质页岩,页理发育;笔石含量较高,介于5%~15%,笔石带为WF2—WF3;层间夹2层厚度为1~3 cm的斑脱岩。

厚0.92 m

—————整合—————

临湘组

1层:灰色中厚层状微晶灰岩,夹瘤状灰岩,地表溶蚀作用较强,呈小沟槽状,未见底。

黄莺乡剖面五峰组主体处于凯迪阶深水陆棚亚相,发育扁平叉笔石(*Dicellograptus complanatus* Lapworth),笔石含量介于15%~40%,笔石带为WF2—WF3。龙马溪组一段出露地层处于鲁丹阶深水陆棚亚相,岩性为灰黑色硅质页岩,笔石含量极为丰富,见直管笔石(*Rectograptus*)、矛状栅笔石(*Climacograptus hastatus*)、雕刻笔石(*Persculptograptus persculptus*)、尖笔石(*Akidograptus ascensus*)等典型笔石,笔石带为LM1—LM5。

黄莺乡剖面五峰组—龙马溪组一段出露地层的岩性、电性特征与武隆向斜LY1、LY2井的①—⑤小层基本一致,厚度有一定差异(图5)。五峰组主体为黑色页岩,顶部发育0.2~0.32 m厚观音桥段灰质泥岩—泥质灰岩;龙马溪组一段②—⑤小层岩性以硅质页岩为主,整体伽马值较高,其中②小层和④小层发育两个异常高伽马尖峰。厚度上表现出①—⑤小层由南向北有变厚趋势,说明北部更靠近深水陆棚沉积中心,厚度更大。

3 沉积环境及演化

渝东南地区五峰—龙马溪组沉积环境处于水体

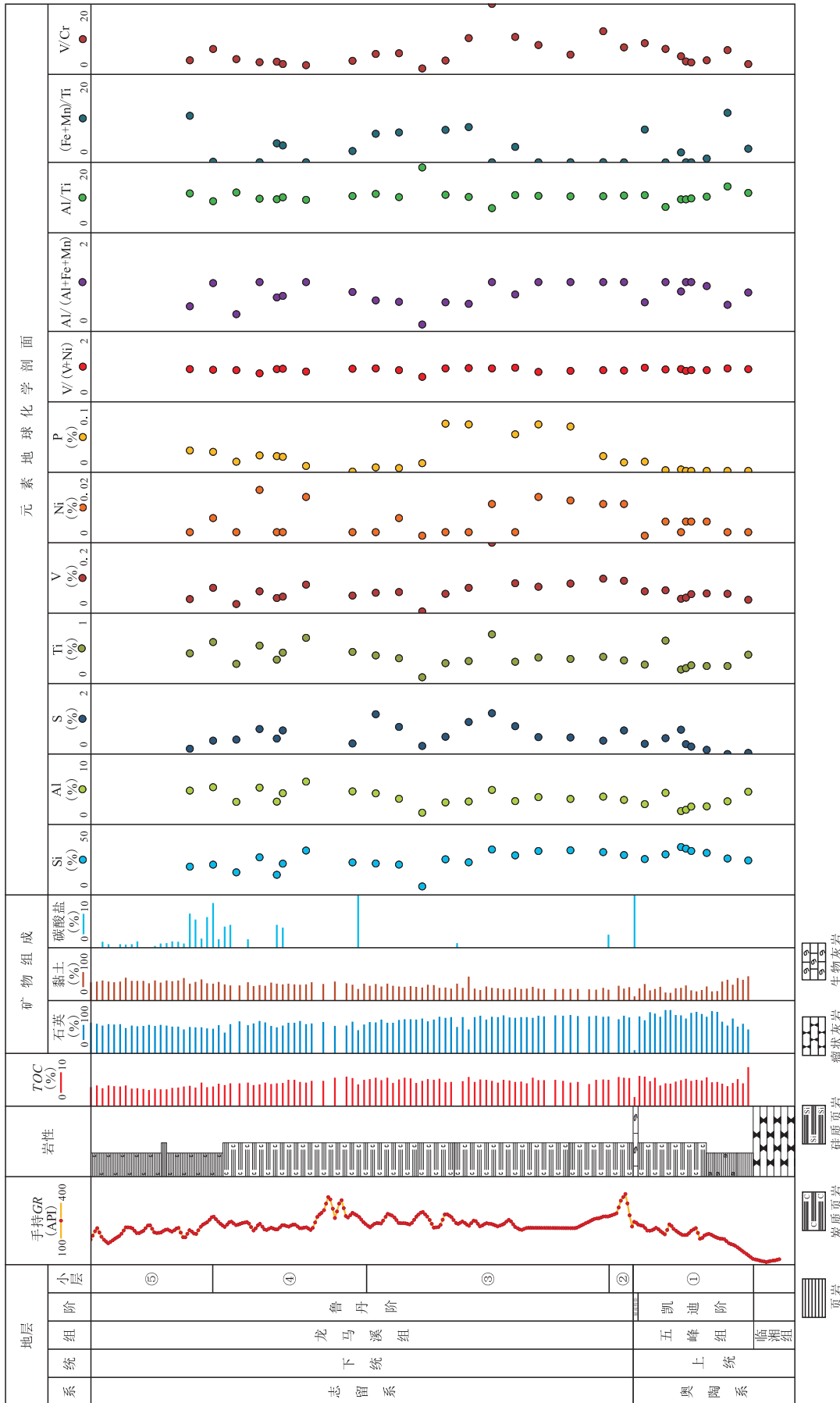


图5 重庆市武隆区黄莺乡剖面五峰组—龙马溪组优质页岩元素地球化学剖面
Fig. 5 Geochemical profile of high-quality shale elements of Wufeng-Longmaxi Formation of Huangying section, Wulong, Chongqing

呈弱分层的缺氧环境,随深度变浅,沉积环境由还原向次还原、次氧化过渡,笔石存在深度分带现象^[16-22]。根据黄莺乡剖面岩性组合、笔石发育特征、元素地球化学、有机地球化学等资料,讨论沉积环境变化规律。

3.1 凯迪期

凯迪期,受川中古隆起、黔中古隆起和江南雪峰隆起的影响,四川盆地及周缘大部分地区形成局限的深水缺氧沉积环境,沉积了五峰组中一薄层黑色硅质页岩,局部见黄铁矿。黄莺乡剖面凯迪阶黑色页岩厚度为6.5 m,笔石化石保存较为完整,呈无序状态分布于页岩中,表明为静水环境。凯迪阶黑色硅质页岩的V/(V+Ni)比值为0.88~0.97,平均为0.92,整体大于0.46(表1、图6),说明WF2—WF3笔石带所处为厌氧的还原静水深水陆棚环境,有利于沉积有机质的保存。Al/Ti比值高,说明表层水体富营养,利于藻类、放射虫、笔石等古生物繁殖^[23],古生产力高。剖面样品Al/(Al+Fe+Mn)比值为0.54~1.00,平均为0.87,表明主要为生物成因硅。在硅质页岩中间夹16层0.2~3 cm薄层斑脱岩,表明构造活动剧烈,火山运动频繁^[24-26],火山灰带来的营养成分可提高古海洋生产力。上述因素的共同作用,导致凯迪阶黑色页岩有机质丰度较高,TOC(总有机碳含量)为3.82%~7.38%,平均为4.88%。

3.2 赫南特期

赫南特期,受全球冰期和广西运动的影响,海平面大幅降低,在四川盆地及周缘沉积了观音桥段介

壳泥质灰岩、灰质泥岩(钙质含量大于20%,TOC小于1%),平面上分布不连续^[20],黄莺乡剖面观音桥段厚度约为0.32 m,武隆向斜钻井揭示厚度为0.37~0.60 m。海平面下降导致沉积环境由深水陆棚亚相转变为浅水陆棚亚相,笔石发生生物大灭绝,冷水型赫南特动物群开始繁盛。

3.3 鲁丹期

鲁丹期,气温回暖,海水快速上升,形成与凯迪期范围大致相同的深水陆棚亚相沉积环境^[23],沉积了一套厚层黑色富有机质富笔石页岩,V/(V+Ni)比值为0.71~0.97,平均为0.90(见表1、图6),表明处于强还原沉积环境,利于笔石和藻类等古生物保存。但各小层特征存在一定差异,反应沉积微相存在一定差异。②—⑤小层岩性由黑色硅质页岩逐渐变为灰黑色页岩,笔石带由LM2持续演化到LM5,含量逐渐减少,TOC含量由5.43%逐渐减小至3.58%,说明海平面逐渐下降,水体逐渐变浅。

渝东南地区凯迪阶至鲁丹阶水体深度逐渐变浅,不同地区沉积环境和沉积演化有一定的差异,造成地层的岩性、厚度、元素组成有较大差异^[15]。凯迪期,武隆地区处于深水陆棚沉积环境,沉积速率较慢,为2.64 m/Ma,黑色页岩厚度介于5~7 m。赫南特期,受海平面下降及局部隆升影响,沉积环境发生较大变化,武隆地区发育水下低隆(图7),沉积了0.2~0.4 m厚浅水陆棚观音桥段介壳泥质灰岩。鲁丹期,再次海侵形成深水陆棚沉积环境,笔石种类发生较大变化,沉积速率加快,为6.5~7.0 m/Ma,形成的黑色页岩厚度为28~30 m。

从沉积建造来看,由西北的焦石坝向东南的南川、武隆、彭水地区,虽然同处于深水陆棚亚相,但受水体深度和沉积古地形的影响,优质页岩厚度逐渐减薄^[12-14,27]。焦石坝地区处于深水陆棚沉积中心(图7),优质页岩厚度介于35~45 m^[28];南川地区处于深水陆棚中心外侧,优质页岩厚度介于31~35 m;武隆地区优质页岩厚度介于32~35 m,厚度较焦石坝地区减薄,但有机质丰度、石英含量更高,为生烃中心。

4 地质意义

黄莺乡剖面揭示武隆地区五峰—龙马溪组沉积

表1 重庆市武隆区黄莺乡剖面五峰—龙马溪组元素分析及沉积环境统计

Table 1 Elemental analysis and sedimentary environment statistics of Wufeng-Longmaxi Formation in Huangying section, Wulong, Chongqing

阶	V/(V+Ni)	Al/(Al+Fe+Mn)	Al/Ti	沉积相
鲁丹阶	$\frac{0.71 \sim 0.97}{0.90}$	$\frac{0.14 \sim 1.00}{0.75}$	$\frac{7.00 \sim 18.56}{10.59}$	深水陆棚相
赫南特阶	0.97	0.59	7.36	闭塞浅海相
凯迪阶	$\frac{0.88 \sim 0.97}{0.92}$	$\frac{0.54 \sim 1.00}{0.87}$	$\frac{9.50 \sim 13.16}{10.59}$	深水陆棚相

注:表中分式意义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

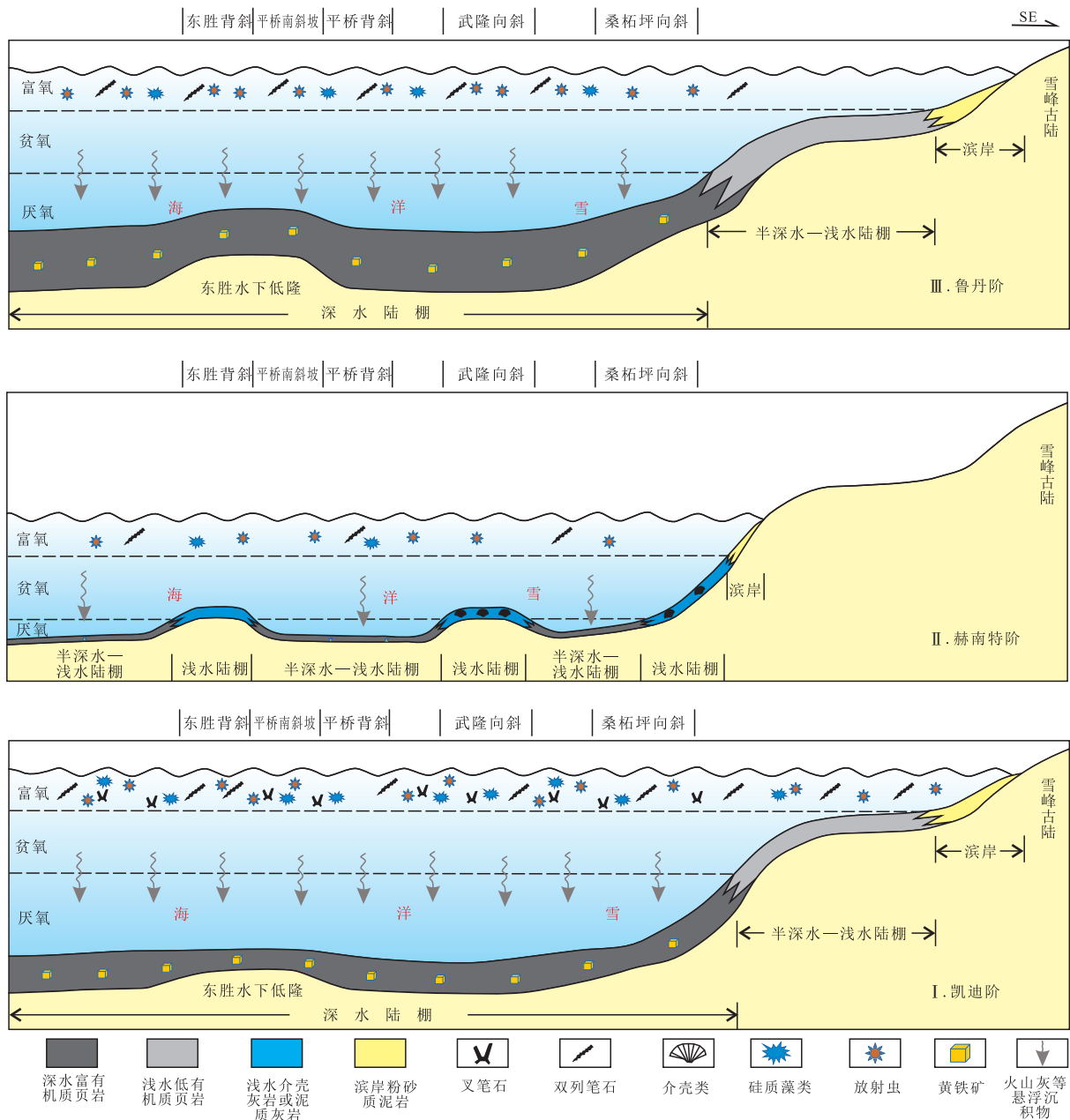


图6 渝东南地区凯迪阶—鲁丹阶沉积演化模式(据本文参考文献[15],有修改)

Fig. 6 Sedimentary evolution mode of Kaidian-Rudan in southeastern Chongqing (modified by references [15])

时期处于深水陆棚生烃中心,古生物繁盛,古生产力高,水体相对安静、强还原环境,有利于页岩缓慢堆积及有机质的富集和保存,从而沉积了一套厚度为31~35 m、TOC为3.5%~4.5%的富有机质页岩。在深水陆棚环境下形成的这套富有机质页岩同时具备生烃能力强、储层物性好、含气量高等特性,控制了页岩气成藏的物质基础。

1) 页岩气静态指标

为了精细反映五峰组—龙马溪组页岩气静态指标随沉积环境变化的规律,对黄莺乡剖面进行连续取样,取样间隔为0.5 m,共采集样品29件。除风化严重或被覆盖层段,所有样品均为通过剥离地表风化层后采集的新鲜岩石。

测试结果揭示,黄莺乡剖面五峰组—龙马溪组

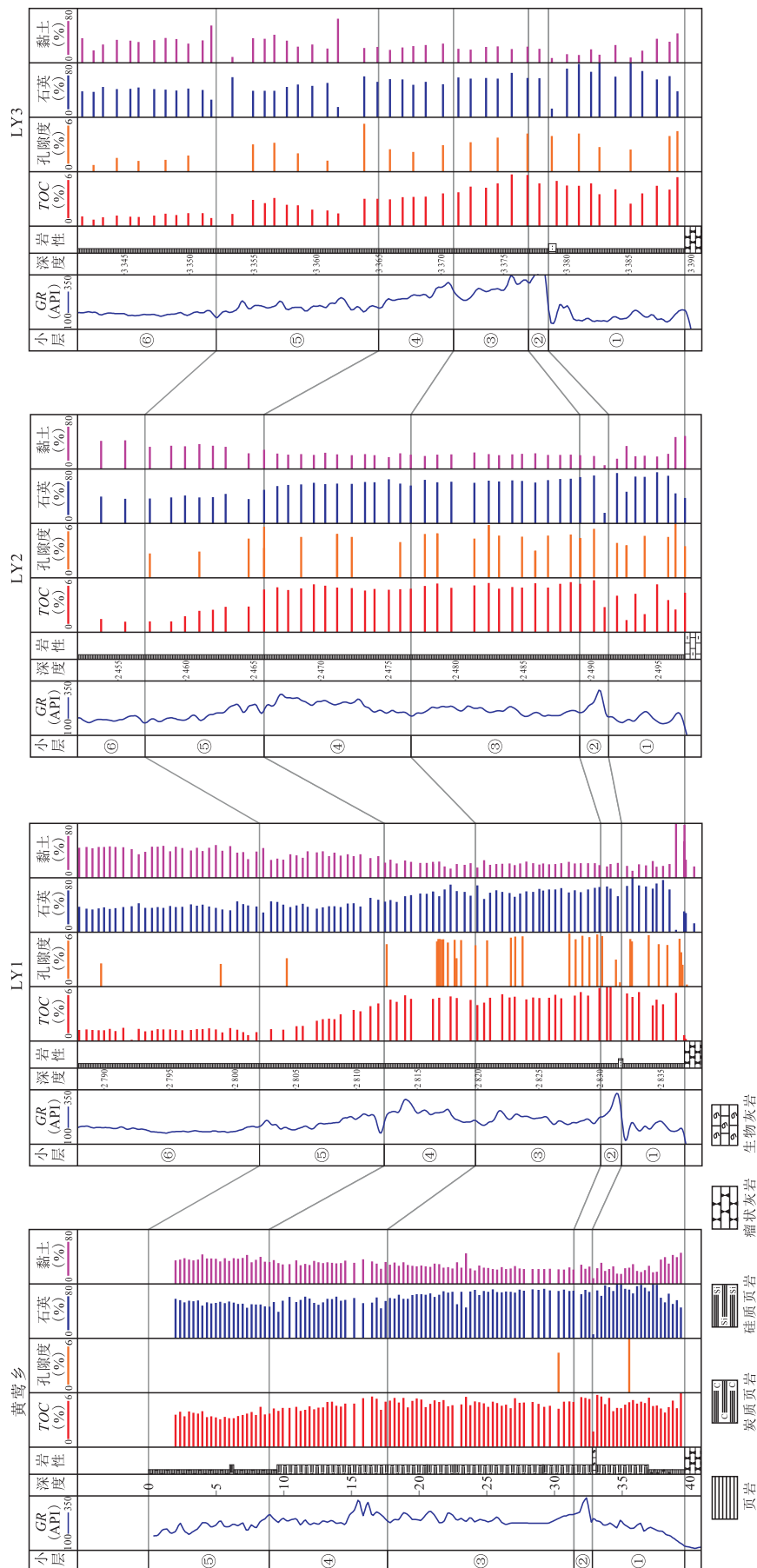


图7 重庆市武隆地区五峰—龙马溪组优质页岩静态指标对比剖面
Fig. 7 Comparative outcrop section of static indicators of high-quality shale in Wufeng-Longmaxi Formation in Wulong, Chongqing

TOC为1.74%~7.38%,平均为3.95%;孔隙度为4.41%~7.49%,平均为5.95%;石英含量为6.10%~82.00%,平均为61.02%,黏土含量为8.20%~45.90%,平均为28.70%; R_o (有机质成熟度)为2.37%~3.06%,平均为2.60%(表2)。

2) 平面分布特征

整体来看,武隆地区处于深水陆棚相生烃中心,优质页岩厚度大(31~35 m),地化指标优越(TOC介于3.56%~4.55%),页岩生烃强度大,具备良好的页岩

气富集物质基础;储层物性好,孔隙度为3.25%~5.59%;页岩脆性矿物含量高,可压性好,石英含量为54.01%~62.56%(表3)。从平面分布特征上看,武隆地区优质页岩静态指标介于南川和焦石坝之间,武隆向斜西部的团堡次凹优于东部的火炉次凹(图8)。

3) 页岩气勘探潜力

总体来看,武隆向斜处于深水陆棚相沉积中心,优质页岩厚度大(31~35 m),静态指标优越(TOC介于3.56%~4.55%,孔隙度介于3.25%~5.59%),页

表2 重庆市武隆区黄莺乡剖面各小层页岩气地质参数统计
Table 2 Geological parameters of shale gas in Huangying section, Wulong, Chongqing

层号	层厚(m)	手持GR(API)	TOC(%)	孔隙度(%)	石英(%)	黏土(%)	R_o (%)
⑤	8.92	166.20~206.91 206.91	3.08~4.44 3.58(21)		45.10~58.00 52.03(21)	31.7~43.4 36.63(21)	
④	8.74	216.46~330.48 248.04	3.71~5.58 4.55(23)		39.10~61.10 54.38(23)	22.10~36.10 31.02(23)	3.06(1)
③	13.78	218.78~279.71 241.31	4.23~5.56 4.88(39)	4.41(1)	45.2~72.8 66.12(39)	19.9~45.1 25.20(39)	2.48~2.69 2.57(5)
②	1.36	268.20~340.96 288.47	5.32~5.53 5.43(3)		64.8~71.2 68.03(3)	22.4~28.3 25.33(3)	2.37~2.52 2.45(2)
①	6.83	120.23~246.06 197.97	3.82~7.38 4.88(23)	7.49(1)	6.10~82.00 66.31(23)	8.20~45.90 25.51(23)	2.45~2.59 2.59(5)

注:表中分式意义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}(\text{样品数})}$ 。

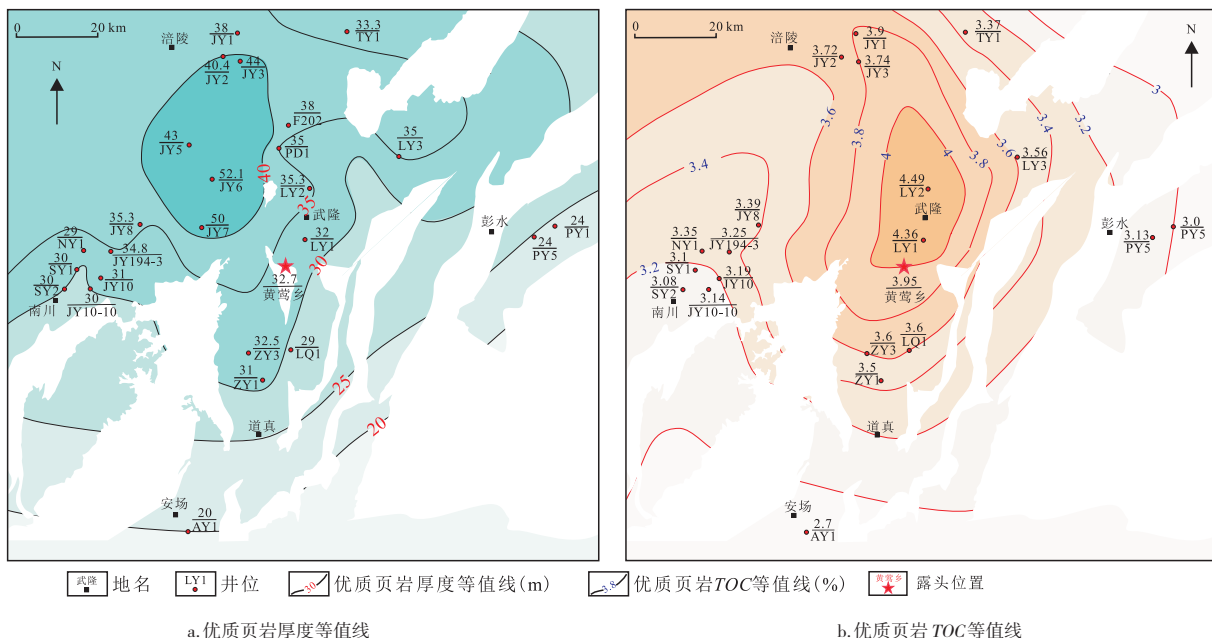


图8 重庆市武隆地区五峰—龙马溪组优质页岩静态指标分布

Fig. 8 Static index distribution of high-quality shale in Wufeng-Longmaxi Formation in Wulong, Chongqing

表3 重庆市武隆向斜优质页岩段评价参数对比
Table 3 Comparison of evaluation parameters of high-quality shale section in Wulong Syncline, Chongqing

层号	层厚 (m)	TOC (%)	孔隙度 (%)	石英含量 (%)	黏土含量 (%)	R_o (%)
黄莺乡	32.7	3.95	5.59	61.02	28.70	2.60
LY1	31.0	4.36	4.21	62.56	25.59	2.58
LY2	35.0	4.49	4.46	57.07	23.67	2.95
LY3	35.0	3.56	3.25	54.01	25.06	3.13

岩生烃强度大,具备良好的页岩气富集物质基础。武隆地区①—④小层为深水陆棚亚相细粒沉积,水体较深,上层海水营养丰富,笔石、放射虫、浮游藻类等生物化石含量多,古生产力高,沉积有机质丰富,为成烃中心,TOC大于4.0%;矿物组成以硅质为主,生物成因硅质含量高,黏土含量适中,储层可改造性较好,因此,①—④小层是页岩气勘探开发甜点段。该向斜已完钻的3口探井,测试日产气量达到 $(4.6 \sim 9.2) \times 10^4 \text{ m}^3$,实现了盆外残留向斜区常压页岩气的勘探突破,证实该区具有较好的勘探开发潜力,目前正在开展降本增效攻关试验,力争实现商业开发。

5 结论

1) 重庆武隆区黄莺乡剖面出露五峰—龙马溪组下部地层识别出3个阶8个笔石带(WF2—LM5笔石带),笔石种类、含量、保存特征等与沉积环境密切相关。凯迪阶、鲁丹阶总体为强还原的深水陆棚沉积环境,形成了厚层黑色硅质页岩,笔石丰富,有机质丰度高;两者之间的赫南特阶形成了富含赫南特贝的观音桥段深灰色介壳泥质灰岩,指示武隆地区发育水下低隆,沉积环境转变为浅水陆棚。

2) 黄莺乡剖面揭示武隆地区五峰组—龙马溪组①—④小层的页岩气成藏物质基础和富集条件较好,是页岩气勘探开发甜点段。

3) 武隆向斜处于深水陆棚相成烃中心,优质页岩厚度大,静态指标优越,页岩生烃强度大,具备较好的页岩气富集物质基础,进一步开展降本增效攻关试验,将能实现盆外常压页岩气商业开发。

参考文献

[1] 郭旭升,胡东风,李宇平,等.涪陵页岩气田富集高产主控地质因素[J].石油勘探与开发,2017,44(4):481-491.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, LI Yuping, et al. Geological

factors controlling shale gas enrichment and high production in Fuling shale gas field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 481-491.

[2] 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:地球科学,2017,47(6):720-732.
CHEN Xu, FAN Junxuan, 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.

[3] 贾云倩,刘子平,任晓海,等.有机质类型分异规律及其主控机制——以威远志留系龙马溪组页岩储层为例[J].沉积学报,2021,39(2):341-352.
JIA Yunqian, LIU Ziping, REN Xiaohai, et al. Organic matter type differentiation process and main control mechanism: case study of the Silurian Longmaxi Formation shale reservoir in Weiyuan area[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(2): 341-352.

[4] 华柑霖,吴松涛,邱振,等.页岩纹层结构分类与储集性能差异——以四川盆地龙马溪组页岩为例[J].沉积学报,2021,39(2):281-296.
HUA Ganlin, WU Songtao, QIU Zhen, et al. Lamination texture and its effect on reservoir properties: A case study of Longmaxi Shale, Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(2): 281-296.

[5] 管全中,董大忠,张华玲,等.富有机质页岩生物成因石英的类型及其耦合成储机制——以四川盆地上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组为例[J].石油勘探与开发,2021,48(4):700-709.
GUAN Quanzhong, DONG Dazhong, ZHANG Hualing, et al. Types of biogenic quartz and its coupling storage mechanism in organic-rich shales: A case study of the Upper Ordovician Wufeng Formation to Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(4): 700-709.

[6] 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):464-473.
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):464-473.

[7] 胡东风.四川盆地东南缘向斜构造五峰组—龙马溪组常压页岩气富集主控因素[J].天然气地球科学,2019,30(5):605-615.
HU Dongfeng. Main controlling factors on normal pressure shale gas enrichment in Wufeng-Longmaxi Formations in synclines, southeast Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(5): 605-615.

[8] 马新华,谢军,雍锐,等.四川盆地南部龙马溪组页岩气地质特征及高产控制因素[J].石油勘探与开发,2020,47(5):1-15.
MA Xinhua, XIE Jun, YONG Rui, et al. Geological

- characteristics and high production control factors of shale gas in Silurian Longmaxi Formation, southern Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 1-15.
- [9] 姜振学,宋岩,唐相路,等.中国南方海相页岩气差异富集的控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(3): 617-628.
JIANG Zhenxue, SONG Yan, TANG Xianglu, et al. Controlling factors of marine shale gas differential enrichment in southern China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(3): 617-628.
- [10] 郭彤楼,蒋恕,张培先,等.四川盆地外围常压页岩气勘探开发进展与攻关方向[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 837-845.
GUO Tonglou, JIANG Shu, ZHANG Peixian, et al. Progress and direction of exploration and development of normally-pressured shale gas from the periphery of Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 837-845.
- [11] 何希鹏.四川盆地东部页岩气甜点评价体系与富集高产影响因素[J]. *天然气工业*, 2021, 41(1): 59-71.
HE Xipeng. Sweet spot evaluation system and enrichment and high yield influential factors of shale gas in Nanchuan area of eastern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(1): 59-71.
- [12] 郭少斌,王子龙,马啸.中国重点地区二叠系海陆过渡相页岩气勘探前景[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(3): 377-385.
GUO Shaobin, WANG Zilong, MA Xiao. Exploration prospect of shale gas with Permian transitional facies of some key areas in China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021, 43(3): 377-385.
- [13] 何希鹏,何贵松,高玉巧,等.渝东南盆缘转换带常压页岩气地质特征及富集高产规律[J]. *天然气工业*, 2018, 38(12): 1-14.
HE Xipeng, HE Guisong, GAO Yuchiao, et al. Geological characteristics and enrichment laws of normal-pressure shale gas in the basin-margin transition zone of SE Chongqing[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(12): 1-14.
- [14] 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.
- [15] 何贵松,何希鹏,高玉巧,等.渝东南盆缘转换带金佛斜坡常压页岩气富集模式[J]. *天然气工业*, 2020, 40(6): 50-60.
HE Guisong, HE Xipeng, GAO Yuchiao, et al. Enrichment model of normal-pressure shale gas in the Jinfo slope of the basin-margin transition zone in Southeast Chongqing[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(6): 50-60.
- [16] 郑宇龙,牟传龙,王秀平.四川盆地南缘五峰组—龙马溪组沉积地球化学及有机质富集模式——以叙永地区田林剖面为例[J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(5): 541-560.
ZHENG Yulong, MOU Chuanlong, WANG Xiuping. Sedimentary geochemistry and patterns of organic matter enrichment of Wufeng-Longmaxi Formations in the Southern Margin of Sichuan Basin, China: A case study of Tianlin profile in Xuyong Area[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(5): 541-560.
- [17] 韩京,蔡全升,黎洋,等.海相优质页岩的形成环境及发育模式——以中扬子地区秭归新滩剖面五峰—龙马溪组页岩为例[J]. *古地理学报*, 2019, 21(4): 661-674.
HAN Jing, CAI Quansheng, LI Yang, et al. Forming environment and development model of high-quality marine shale: A case of the Wufeng-Longmaxi Formations shale in Zigui-Xintan section in the Middle Yangtze region[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2019, 21(4): 661-674.
- [18] 董大忠,施振生,孙莎莎,等.黑色页岩微裂缝发育控制因素——以长宁双河剖面五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(5): 763-774.
DONG Dazhong, SHI Zhensheng, SUN Shasha, et al. Factors controlling microfractures in black shale: A case study of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in Shuanghe Profile, Changning area, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(5): 763-774.
- [19] 李一凡,魏小洁,樊太亮.海相泥页岩沉积过程研究进展[J]. *沉积学报*, 2021, 39(1): 73-87.
LI Yifan, WEI Xiaojie, FAN Tailiang. A review on sedimentary processes of marine mudstones and shales[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(1): 73-87.
- [20] 聂海宽,李东晖,姜涛,等.基于笔石带特征的页岩等时地层测井划分方法及意义——以四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组为例[J]. *石油学报*, 2020, 41(3): 273-283.
NIE Haikuan, LI Donghui, JIANG Tao, et al. Logging isochronous stratigraphic division of shale based on characteristics of graptolite zones and its significance: A case study of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(3): 273-283.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 方志雄,何希鹏.渝东南武隆向斜常压页岩气形成与演化[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(6): 819-827.