

文章编号:1673-5005(2020)03-0015-11 doi:10.3969/j. issn. 1673-5005. 2020. 03. 002

# 川南地区龙马溪组沉积亚相精细划分及地质意义

蒲泊伶<sup>1,2</sup>, 董大忠<sup>3,4,5</sup>, 王凤琴<sup>1,2</sup>, 刘桂珍<sup>1,2</sup>, 王玉满<sup>3</sup>, 黄金亮<sup>3</sup>

(1. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西西安 710065; 2. 西安石油大学陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西西安 710065; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 国家能源页岩气研发(实验)中心, 河北廊坊 065007;  
5. 中国石油天然气集团有限公司非常规油气重点实验室, 河北廊坊 065007)

**摘要:**为查明川南地区下志留统龙马溪组富有机质页岩的沉积演化特征,通过岩性、岩相、沉积构造、有机质含量、矿物组成、生物化石和测井响应等特征,对龙马溪组页岩的岩相及沉积亚相类型进行精细划分,并建立四川盆地南部龙马溪组页岩沉积演化模式。结果表明:研究区龙马溪组页岩发育笔石页岩相、碳质页岩相、硅质页岩相、钙质页岩相、泥质灰岩相、粉砂质页岩相、黏土岩相 7 种岩石相类型;沉积亚相类型可划分为深水陆棚亚相、半深水陆棚亚相及浅水陆棚亚相 3 种类型;从笔石的生存环境来看,不同地质时代沉积水深存在差异;龙马溪组沉积时期从鲁丹阶到特列奇阶,沉积中心从长宁地区逐渐向北西方向迁移到威远地区,威远地区经历了 3 期沉积,长宁地区经历了 2 期沉积;川南地区受古沉积环境和古构造演化的影响,龙马溪组页岩在岩相、沉积亚相分布上具有较大差异,表现出极强的非均质性;深水陆棚亚相沉积为页岩气富集的最有利沉积带。

**关键词:**页岩气; 页岩沉积亚相; 沉积演化; 川南地区

**中图分类号:**TE 121.1      **文献标志码:**A

**引用格式:**蒲泊伶,董大忠,王凤琴,等.川南地区龙马溪组沉积亚相精细划分及地质意义[J].中国石油大学学报(自然科学版),2020,44(3):15-25.

PU Boling, DONG Dazhong, WANG Fengqin, et al. Re-division and evolution of sedimentary subfacies of Longmaxi shale in southern Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2020, 44(3):15-25.

## Re-division and evolution of sedimentary subfacies of Longmaxi shale in southern Sichuan Basin

PU Boling<sup>1,2</sup>, DONG Dazhong<sup>3,4,5</sup>, WANG Fengqin<sup>1,2</sup>, LIU Guizhen<sup>1,2</sup>, WANG Yuman<sup>3</sup>, HUANG Jinliang<sup>3</sup>

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;  
2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;  
3. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;  
4. National Energy Shale Gas Research & Development (Experimental) Center, Langfang 065007, China;  
5. Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas Resources, PetroChina, Langfang 065007, China)

**Abstract:** In order to identify the sedimentary characteristics of the organic-rich shale from the Longmaxi Formation of the Lower Silurian in the southern Sichuan Basin, a series of studies, including lithology, lithofacies, sedimentary structures, organic matter contents, mineral composition, biogenic fossils and logging responses, were carried out in this paper. The lithofacies and sedimentary subfacies were classified, and the sedimentary evolution model of Longmaxi shale in southern Sichuan Basin was established. The results show that: there are seven types of lithofacies developed in the Longmaxi shale, including graptolite-rich shale, carbonaceous shale, siliceous shale, calcareous shale, muddy limestone, silty shale and argillaceous shale. Three types of sedimentary subfacies were developed, including deep-water shelf, semi-deep-water shelf and shallow shelf. According to the physical condition of the graptolite, the sedimentary water depth was different in different geological

收稿日期:2019-11-05

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05035); 西安石油大学博士科研启动基金项目(2014BS07)

作者简介:蒲泊伶(1981-),女,讲师,博士,研究方向为页岩气富集地质条件。E-mail:sd\_yujiao@sina.com。

ages. When the Longmaxi formation was deposited, through the Rudan stage to the Telychian stage, the sedimentary center gradually migrated from the Changning area to the north-west Weiyuan area. Three stages of sediments were deposited in the Weiyuan area, while there were only two stages of sediments deposited in the Changning area. It is concluded that there are great differences in the distribution of lithofacies and sedimentary subfacies of the Longmaxi shale in southern Sichuan Basin due to the influence of palaeosedimentary environment and paleotectonic evolution, showing strong heterogeneity. Deep-water shelf is the best favorable sedimentary subfacies for shale gas enrichment.

**Keywords:** shale gas; shale sedimentary subfacies; sedimentary evolution; southern Sichuan Basin

川南龙马溪组页岩气勘探生产中发现,并非所有页岩气井都能获得高产,且同一口页岩气井中不同层段含气性也有较大差异,而导致页岩气井产量差异大的原因尚不明确。页岩含气量通常受到页岩厚度、矿物组成、有机质丰度及类型、热演化程度和岩相类型等多种因素影响,而这些地质因素均与页岩沉积条件的变化密切相关,因此对沉积演化特征的研究有利于对这一问题的探索,可以为页岩气富集规律提供一定的理论指导。中国已有部分学者对研究区龙马溪组的沉积特征<sup>[1-3]</sup>开展一些研究,建立页岩层序地层格架<sup>[4-6]</sup>,发现威远和长宁地区富有机质页岩的沉积时间存在较大的差异<sup>[7-8]</sup>。因此对川南地区龙马溪组页岩沉积亚相的精细划分,结合生物地层年代分析,可以更全面地了解研究区龙马溪组页岩在时空上的演变,探寻沉积条件对优质页岩的控制作用,以期为页岩气的勘探提供指导。

## 1 地层与岩性特征

### 1.1 地 层

自震旦纪以来,四川盆地经历了多期构造运动<sup>[9]</sup>,志留纪末的晚加里东运动使下古生界地层褶皱变形,盆地整体抬升成陆,大部分地区露出水面,导致志留系地层遭受不同程度剥蚀<sup>[10-11]</sup>。志留系在多数地区仅保留了下志留统龙马溪组、石牛栏组/小河坝组及中志留统韩家店组。下志留统龙马溪组沉积的时期是中国南方挤压最强烈的时期,强烈的构造挤压作用影响龙马溪组页岩的沉积及厚度分布<sup>[12]</sup>。在威远地区龙马溪组顶部灰绿色页岩直接与下二叠统梁山组黑灰色泥质灰岩呈不整合接触,缺少下志留统石牛栏组及志留系中上统沉积,龙马溪组底部发育厚度为20~40 m黑色页岩、硅质页岩,与下伏上奥陶统五峰组观音桥段介壳灰岩呈整合接触;长宁地区地层发育较全,龙马溪组顶部深灰色粉砂质页岩与上覆石牛栏组呈整合接触,之下与上奥陶统五峰组观音桥段介壳灰岩呈整合接触,底

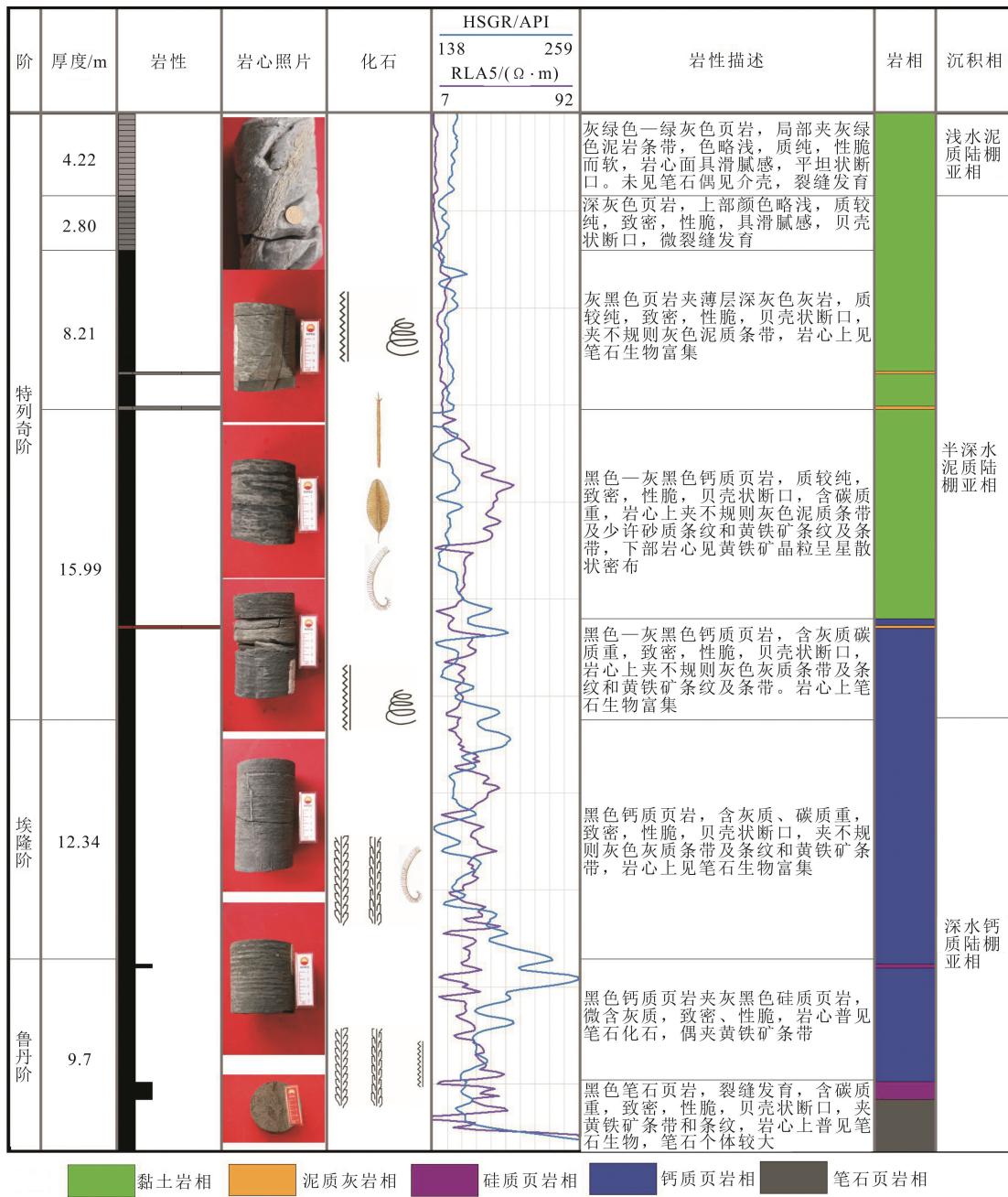
部发育厚度为30~50 m黑色页岩、碳质页岩。

### 1.2 岩石学特征

#### 1.2.1 岩性组合

沉积环境的变化导致地层和岩性组合差异较大。根据岩心观察、薄片鉴定、测井解释及X射线衍射分析,威远地区龙马溪组底部主要发育黑色笔石页岩、黑色碳质页岩、黑色含钙质页岩以及灰黑色硅质页岩等岩石类型,以双列笔石大量发育为特征,含黄铁矿晶粒及结核,页理十分发育,岩石性脆,极易发生破碎;龙马溪组中部为灰黑色页岩夹薄层深灰色灰岩,笔石含量急剧减少,以单列笔石为主,偶见黄铁矿;龙马溪组上部主要发育灰绿色—绿灰色黏土岩,未见笔石化石,偶见介壳,泥质含量极高导致岩性致密不易破碎。龙马溪组整体自下而上页岩颜色逐渐变浅,岩石类型为黑色富有机质页岩→灰黑色页岩→灰绿色黏土岩,颜色由深变浅直到灰绿色;黏土矿物含量逐渐增高,由13.4%增加到70.6%;钙质体积分数含量逐渐降低,由70%减小为0;TOC含量为6.44%~0.14%;伽马值为126~250 API;电阻率为8~50 Ω·m;化石含量从富集到无(图1),有机质含量及生物化石的减少表明沉积水深逐渐变浅<sup>[13]</sup>。

长宁地区龙马溪组底部以发育黑色笔石页岩和黑色碳质页岩为特征(图2),笔石富集,页理十分发育。由于靠近物源,向上水体变浅,砂质含量增高,以灰黑色—深灰色粉砂质页岩夹薄层灰色粉砂岩条带沉积为主。龙马溪组整体由下向上颜色变浅、砂质含量增多。岩石类型为黑色富有机质页岩→灰黑色粉砂质页岩→深灰色粉砂质页岩与灰色泥质粉砂岩薄互层,页岩颜色为黑色→灰色;黏土矿物体积分数含量为18.9%~56.8%;钙质体积分数含量为22%~3.1%;烃源岩残余有机碳含量TOC为6.39%~0.11%;伽马值为106~270 API;电阻率为53~165 Ω·m;化石含量由富集至较少,有机质含量不断减少,沉积水深由深水至半深水-浅水。



黏土岩相 混质灰岩相 硅质页岩相 钙质页岩相 笔石页岩相

图1 威X1井龙马溪组下段综合柱状图

Fig.1 Synthesis column map of lower segment of Longmaxi Formation, well Wei X1

### 1.2.2 岩相类型

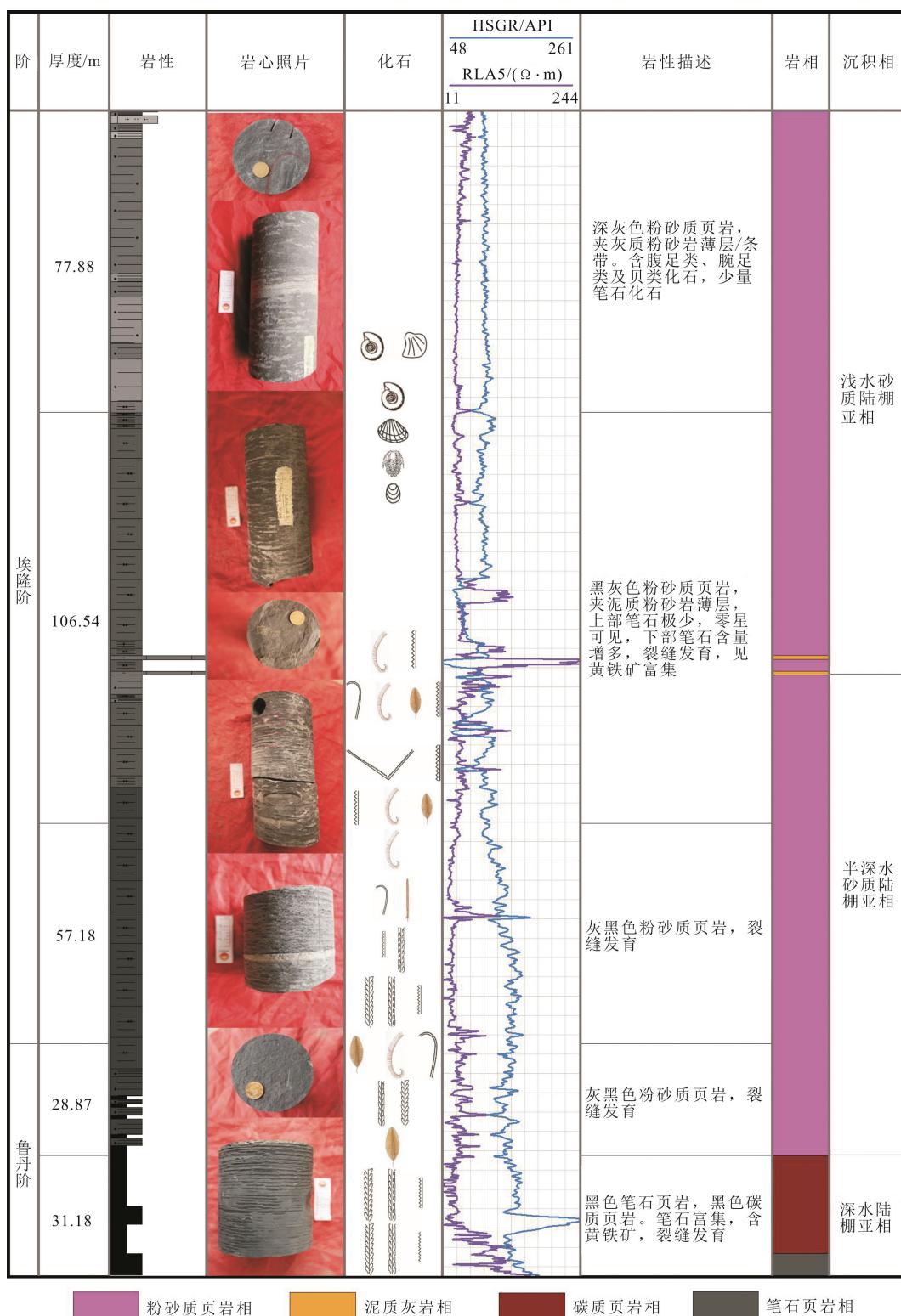
通过岩心观察及详细描述,依据颜色、岩性、颗粒大小以及化石发育情况,将龙马溪组页岩岩相类型划分为笔石页岩相、碳质页岩相、硅质页岩相、钙质页岩相、泥质灰岩相、粉砂质页岩相以及黏土岩相。

**笔石页岩相:**主要发育在龙马溪组下段,页理发育,以笔石大量发育为特征,笔石通常顺层密集分布,笔石体积分数含量大于50%。威远地区主要笔石类型为 *Climacograptus*、*Glyptograptus*、*Rastrites* 和

*Hedograptus*,长宁地区主要是以 *Climacograptus* 为主,其他类型少见。页岩中黄铁矿纹层及黄铁矿晶粒富集,局部见黄铁矿结核。色均,为黑色,质纯,性硬而脆,水平层理。

**碳质页岩相:**发育在长宁地区龙马溪组底部,页理十分发育,水平层理。颜色为黑色,碳质含量极高,十分染手,碳质可能是高有机质在高—过成熟度下发生碳化后的产物。矿物颗粒极细,致密,性脆,贝壳状断口。岩心上普见笔石化石,可见 *Petalolithus*,笔石体积分数含量小于50%。见黄铁矿晶粒

条带或纹层,或以斑点状分布,见钙质纹层。



■ 粉砂质页岩相 ■ 泥质灰岩相 ■ 碳质页岩相 ■ 笔石页岩相

图 2 宁 X3 井龙马溪组综合柱状图

Fig. 2 Synthesis column map of Longmaxi Formation, well Ning X3

硅质页岩相:含硅质较均,致密,性硬且脆,断面光滑,贝壳状断口,夹黄铁矿条纹。水平层理、均质层理。

钙质页岩相:主要发育在威远地区龙马溪组底部。钙质含量极高,点酸强烈起泡,含笔石,形态模糊无法定名,可能为双列笔石。夹黄铁矿纹层,层面

上可见黄铁矿晶体。

泥质灰岩相:含泥质,粉—泥晶结构,致密,性硬。

粉砂质页岩相:主要发育在长宁地区龙马溪组中上部,粉砂质体积分数含量为25%~50%,矿物颗粒较其他页岩略粗,含少量钙质,点酸起泡。

黏土岩相:主要发育在威远地区龙马溪组上部,颜色为灰绿色—绿灰色,泥质含量非常高,最高可达90%以上。色均、质纯,十分致密,性硬。平坦状断面,断面光滑,具滑腻感。

## 2 生物地层年代

中国志留系下统“龙马溪组”相当于世界标准分层中的“兰多维列统”,包含鲁丹阶、埃隆阶和特列奇阶3个时期的沉积。龙马溪组页岩以富含笔石为特征,其中笔石出现演化快的单笔石,成为志留系最主要的分层化石<sup>[14]</sup>。笔石是一种海洋群体生物,生活在不同水深的水层之中<sup>[15]</sup>,但在不同的深度有不同种类的笔石。因此对于笔石在纵向上沉积序列的研究,可以识别沉积时的沉积环境<sup>[16]</sup>和地层年代(图3)。

通过川南地区9口页岩气井页岩岩心中生物化石的识别,不同地区笔石分带具有一定的差异。在威

远地区识别出*Spirograptus guerrichi*, *Demirastites triangularis*, *Petalolithus clavatus*, *P. conicus*, *P. ovalis*, *Oktavites spiralis*, *Pristiograptus*, *Climacograptus*, *Monograptus*, *Orthograptus*, *Glyptograptus*等10多种笔石类型;长宁地区识别出*Petalolithus minor*, *P. ankyratus*, *Demirastites*, *Monograptus*, *Pristiograptus*, *Climacograptus*, *Glyptograptus*, *Hedrograptus*, *Rastrites peregrinus*, *Normalograptus*等10多种笔石类型(图4)。参考国内外对笔石带的划分方案<sup>[17-18]</sup>,结合川南龙马溪组笔石发育特征,鲁丹阶以双列笔石富集为特征,代表水深100~200 m的深水沉积(对于笔石沉积时古水深的判定依据参考陈旭<sup>[16]</sup>志留纪笔石深度分带模式,但实际岩心观察到的笔石类型纵向上分布特征有差异),反映深水陆棚沉积环境;将*Demirastites triangularis*的首现定为埃隆阶的底界,代表水深60~200 m的沉积,反映半深水—深水陆棚沉积环境;*Spirograptus guerrichi*的首现作为特列奇阶的底界,代表沉积水深在20~60 m的浅海沉积,反映浅水陆棚沉积环境。笔石分带特征表明,威远地区龙马溪组沉积时经历了鲁丹阶、埃隆阶和特列奇阶3个时期的沉积,长宁地区缺少特列奇阶特征化石,只在鲁丹阶和埃隆阶两个时期接受沉积。

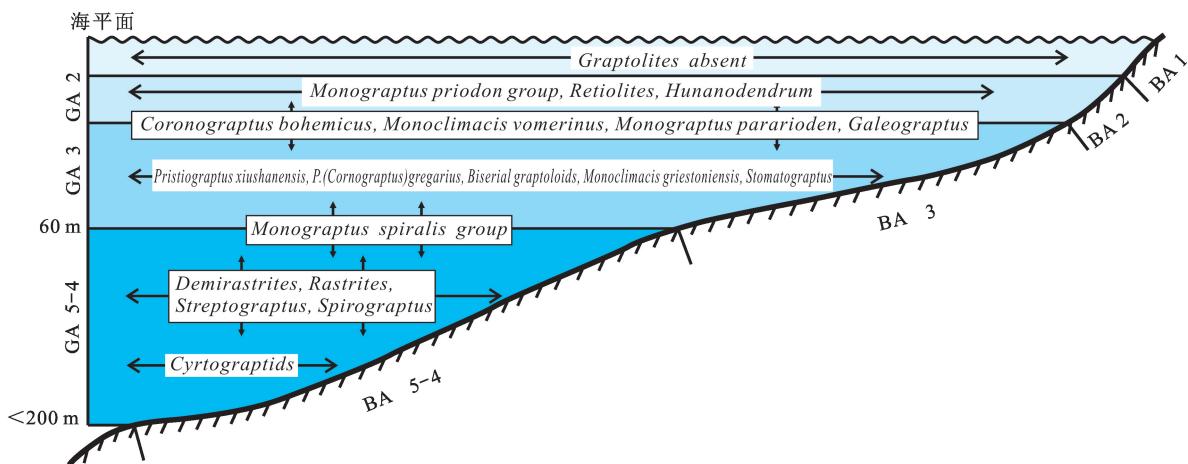


图3 志留纪笔石深度分带模式(据文献[16],有修改)

Fig. 3 Silurian graptolite distribution with depth (After citation[16], modified)

## 3 沉积特征及演化

### 3.1 沉积构造

川南地区龙马溪组页岩沉积构造多样,说明龙马溪组页岩在沉积过程中,沉积环境曾发生过多次变化,造成页岩具有很强的非均质性。通过岩心观察,在目的层识别出块状层理、印模构造、滑塌构造、

水平层理、波纹层理、变形构造、结核等多种构造样式(图5)。其中龙马溪组下段主要发育代表静水环境的水平层理及块状层理,黄铁矿结核较为常见,体现出典型的海相还原环境特征;龙马溪组中上段可见波纹层理、生物潜穴及变形构造,代表了水动力较弱的沉积环境。

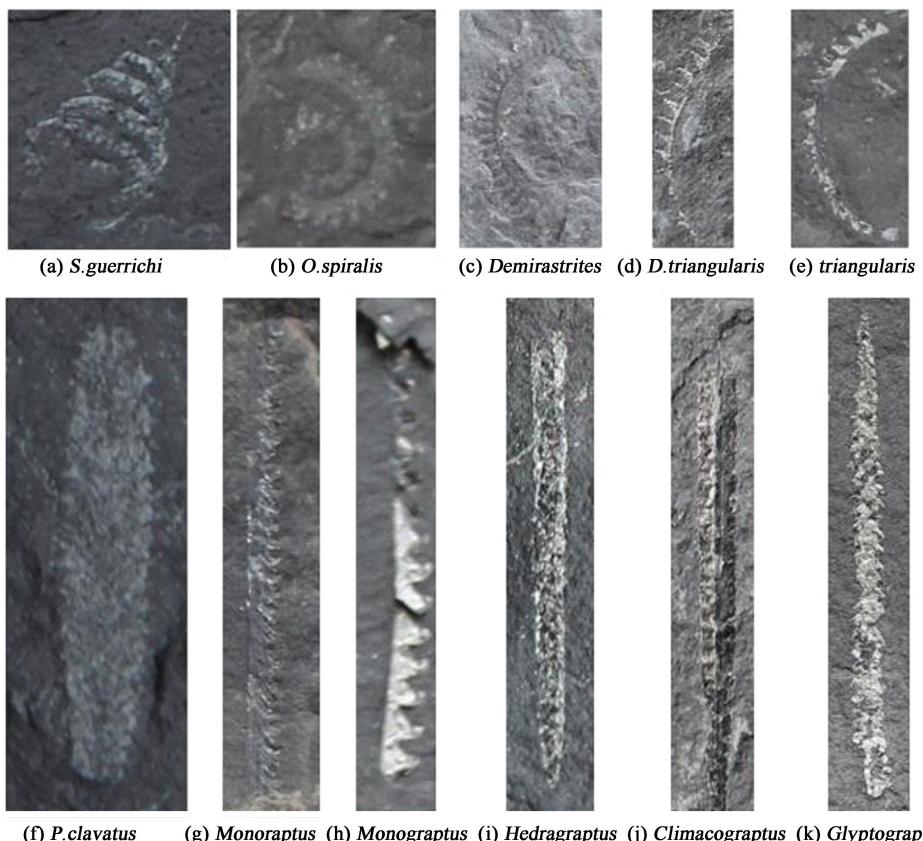


图 4 川南地区龙马溪组页岩笔石化石图版

Fig. 4 Pictures of graptolite in Longmaxi group, southern Sichuan area



图 5 川南地区龙马溪组页岩沉积结构

Fig. 5 Sedimentary structure of Longmaxi shale in southern Sichuan area

### 3.2 沉积亚相划分

早志留世龙马溪期继承了晚奥陶世海侵规模, 地壳稳定持续下沉<sup>[19]</sup>, 以沉积水循环受限的滞留陆棚—深水陆棚亚相为主<sup>[20]</sup>。通过岩性、岩相、沉积构造、有机质含量、矿物组成、生物化石和测井响应等特征, 进一步划分为深水陆棚亚相、半深水陆棚亚相和浅水陆棚亚相 3 种沉积亚相类型。

深水陆棚亚相富含双列笔石, 代表水深 100 ~ 200 m 的深水沉积, 发育水平层理及块状层理。深水陆棚亚相有机质体积分数含量极高, 一般大于 2.0%。富含黄铁矿, 代表较弱的水动力条件及低能的还原环境。深水陆棚亚相可分为碳质和钙质两种: 深水钙质陆棚亚相主要发育在威远地区, 主要岩相类型为钙质页岩相、硅质页岩相和笔石页岩相(图 1)。此段页岩的钙质总体体积分数含量较高, 为 5% ~ 25%。深水钙质陆棚亚相地层的测井伽马值较高, 约为 139 ~ 437 API, 平均为 189 API; 钻时较高约为  $(2.7 \sim 41) \times 10^{-6}$ , 平均为  $12.6 \times 10^{-6}$ ; 中子孔隙度约为 7% ~ 23%, 平均为 18%; 密度略低约为  $2.34 \sim 2.71 \text{ g/cm}^3$ , 平均为  $2.57 \text{ g/cm}^3$ ; 声波时差为  $236.22 \sim 311.68 \mu\text{s/m}$ , 平均为  $282.15 \mu\text{s/m}$ ; 电阻率略高为  $4 \sim 650 \Omega \cdot \text{m}$ , 平均为  $43 \Omega \cdot \text{m}$ 。深水碳质陆棚亚相主要分布在长宁地区, 主要岩相类型为碳质页岩相以及笔石页岩相(图 2)。此段页岩的钙质体积分数含量相对较少, 总体体积分数含量小于 5%, 具有较高伽马(150 ~ 300 API)、高电阻率( $0.2 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ )的测井响应特征。该亚相页岩具有生气潜力大、有机质含量高、岩石脆性好、页理发育的特点, 是页岩气富集的最有利沉积相带。

半深水陆棚亚相富含单列笔石, 见头足类化石, 代表水深 60 ~ 100 m 的沉积, 发育水平层理、块状层理及波状层理, 含黄铁矿, 代表水动力较弱的沉积环境及较低能的还原环境。半深水陆棚亚相可分为泥质和砂质两种: 半深水泥质陆棚亚相主要发育在威远地区, 主要岩相类型为黏土岩相以及少量泥质灰岩相(图 1)。具有高伽马(120 ~ 160 API)、低电阻率( $3 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$ )的测井响应特征。此段页岩的钙质不发育, 总体含量小于 5%, TOC 含量相对较高, 0.5% ~ 2.0%, 具有较好的生气潜力; 半深水砂质陆棚亚相主要发育在长宁地区, 主要岩相类型为粉砂质页岩相、泥质灰岩相(图 2)。具有较高伽马(50 ~ 150 API)、高电阻率( $20 \sim 200 \Omega \cdot \text{m}$ )的测井响应特征。此段页岩的钙质体积分数含量高为 5% ~ 25%, TOC 含量相对较高为 0.5% ~ 2.0%, 具有一定的生气潜力, 粉砂质页岩相物性相对较好、岩石脆性高, 可作为页岩气有利的勘探目标。

威远地区浅水陆棚亚相的主要岩相类型为黏土岩相(图 1), 可见沙纹层理、波状层理等沉积构造, 笔石少见, 以 *Spirograptus guerrichi* 为主, 见腕足类、双壳类、腹足类、头足类等化石(图 6), 代表沉积水深在 20 ~ 60 m 的浅海沉积。具有较高伽马(50 ~ 150 API)、低电阻率(小于  $10 \Omega \cdot \text{m}$ )的测井响应特征, 岩石密度为  $2.6 \sim 2.8 \text{ g/cm}^3$ 。此段页岩的钙质含量极少, 总体体积分数含量小于 5%, TOC 较低, 小于 0.5%, 生气潜力极差, 且岩性十分致密, 不能作为页岩气的有效富集层段, 但可作为下伏产气层段的良好盖层。长宁地区浅水陆棚亚相的主要岩相类型为粉砂质页岩相(图 2), TOC 较低, 小于 0.5%。

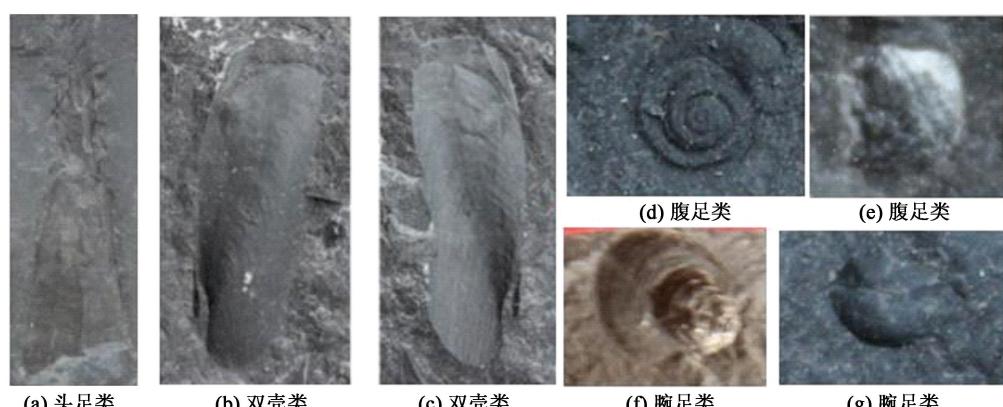


图 6 川南地区龙马溪组页岩化石图版

Fig. 6 Shale fossil map of Longmaxi group in southern Sichuan

根据沉积亚相划分结果, 威远地区发育浅水泥质陆棚亚相、半深水泥质陆棚亚相和深水钙质陆棚

亚相 3 种沉积亚相类型(图 7), 沉积主体为浅水泥质陆棚亚相, 厚度为 140 ~ 250 m, 半深水陆棚亚相

沉积厚度为 25~28 m, 深水陆棚亚相沉积厚度相对较薄, 仅为 8~28 m; 长宁地区发育浅水砂质陆棚亚相、半深水砂质陆棚亚相和深水碳质陆棚亚相(图

7), 浅水砂质陆棚亚相沉积厚度为 39~146 m, 半深水砂质陆棚亚相沉积厚度为 54~124 m, 深水陆棚亚相沉积厚度为 33~46 m。

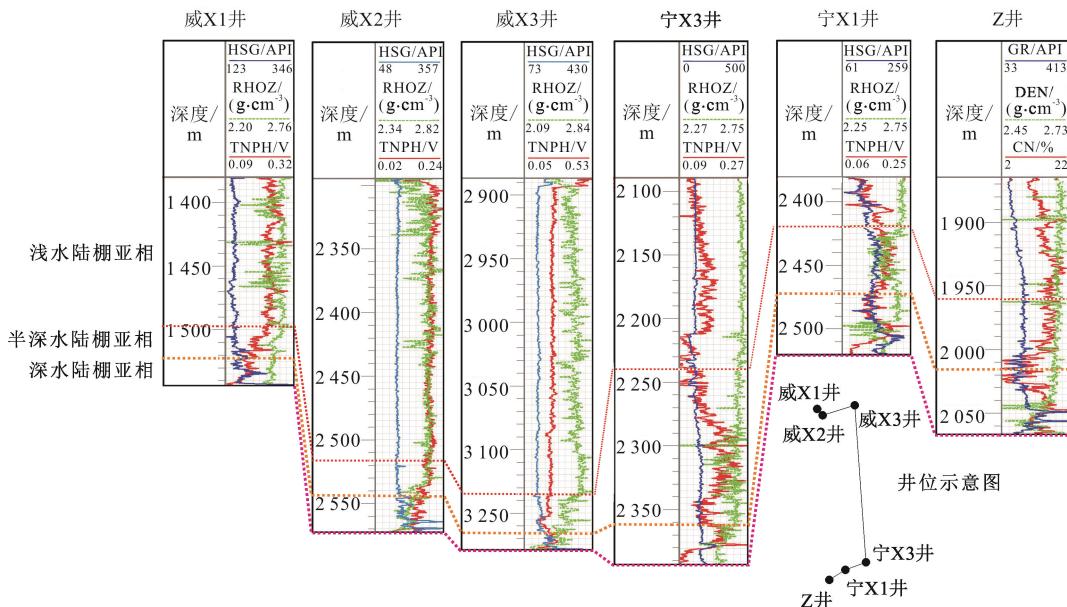


图 7 川南地区龙马溪组沉积亚相连井对比图

Fig. 7 Well connected correlation figure of Longmaxi shale sedimentary subfacies in southern Sichuan area

### 3.3 沉积相模式及演化特征

川南地区龙马溪组页岩厚度、岩性岩相、有机质含量、矿物组成等特征在区域上的变化十分明显, 表现出极强的非均质性。沉积物源、原始沉积环境、海平面的升降以及构造演化特征的不同, 是造成这一差异的主要原因。

受幕式构造变动、沉积物供给、海平面升降和古气候影响, 研究区早志留世沉积过程中存在多期海平面升降事件<sup>[21-23]</sup>, 海水进退变化频繁。从早志留世沉积演化来看, 海侵方向主要来自东部, 即当时存在的湘中、南地区的海槽<sup>[23]</sup>。随着区域构造抬升作用的增强, 海水从北西方向退出<sup>[1]</sup>。志留纪初期, 研究区的相对海平面处于较低的位置, 在周缘古陆的阻隔下, 形成了龙马溪早期闭塞、半闭塞的滞留海盆环境。因而在龙马溪组沉积早期——鲁丹阶, 整个川南处于受限的深水陆棚亚相沉积环境中<sup>[1]</sup>, 川南地区受来自于南东方向挤压作用, 川中隆起及黔中隆起当时为水下的两个隆起, 造成沉积基底具有两边高中间低的特点, 海域自东南向北逐渐变深。黑色富有机质页岩沉积中心分布在赤水一带, 厚度可达 200 m, 沉积厚度由中心向外围逐渐变小, 直到隆起区尖灭。根据前人研究推断, 陆源碎屑物质主要来自包括黔中古隆起在内的前陆隆起带以及雪峰古隆起, 川中古隆起可能仅提供溶解物质。故早志

留世沉积充填具多物源的混合型陆棚沉积性质<sup>[1]</sup>。由于威远地区紧邻川中古隆起, 其物源主要来自于川中古隆起, 以泥质、钙质细粒沉积为主; 长宁地区物源则来自于黔中古隆起, 以泥质、粉砂质细粒沉积为主。

进入埃隆阶, 随着全球海平面下降, 伴随推挤作用的增强, 盆地沉积基底不断抬升, 乐山—龙女寺古隆起逐渐扩大, 海域逐渐缩小, 海平面相对下降, 沉积分异作用加剧<sup>[1]</sup>。构造上随着研究区来自北西方向和南东方向的构造挤压作用的增强, 加速了水深的变浅。两个隆起不断抬升, 海水相对下降, 海域逐渐缩小, 水体深度也不断变浅, 沉积速率逐渐变大<sup>[24]</sup>, 沉积中心不断由南部逐渐向北部迁移。在垂向序列及测井响应上, 构成向上变粗的充填变浅序列<sup>[1]</sup>。由于黔中隆起的抬升作用更加强烈, 使得长宁地区海平面下降更为强烈, 沉积环境此时已由深水陆棚转变为浅水—半深水陆棚。由于距离物源黔中隆起较近, 沉积速度较快, 沉积了厚度为 200~400 m 的粉砂质页岩夹粉砂质条带。这个时期研究区的沉积中心逐渐向北迁移, 在永川地区沉积厚度超过 400 m。川中隆起的抬升作用没有黔中隆起那么强烈, 威远地区仍处于深水环境, 富有机质页岩沉积速率缓慢, 沉积了相对较薄的黑色富有机质页岩, 沉积物厚度较薄, 并向盆地内逐渐尖灭。

到了龙马溪晚期的特列奇阶,构造挤压作用更加剧烈,地层不断抬升,海平面剧烈下降。此时长宁地区已不再接受沉积,威远地区相继沉积了半深水—浅水陆棚亚相,由于物源方向来自于川中隆起,沉积物泥质含量较高,沉积了大套的灰绿色—灰黑色黏土质页岩。因此研究区南部长宁地区缺乏特列奇阶时期的沉积,宜宾—永川以南均未接受沉积,特列奇阶沉积只发生在研究区北部,以威远地区为沉积中心,厚度达100余米,向北逐渐向隆起区渐薄至

尖灭。

综合上述研究成果,绘制川南地区下志留统龙马溪组页岩沉积模式图(图8),表明川南地区龙马溪组页岩的沉积演化受到古沉积环境及构造演化的影响,沉积特征区域变化较大。龙马溪沉积时期,伴随着川中乐山—龙女寺古隆起与雪峰山古隆起的形成并不断扩大,总体上由早期的鲁丹阶以深水陆棚沉积为主,沉积中心不断由南部逐渐向北部迁移,沉积范围逐渐缩小。

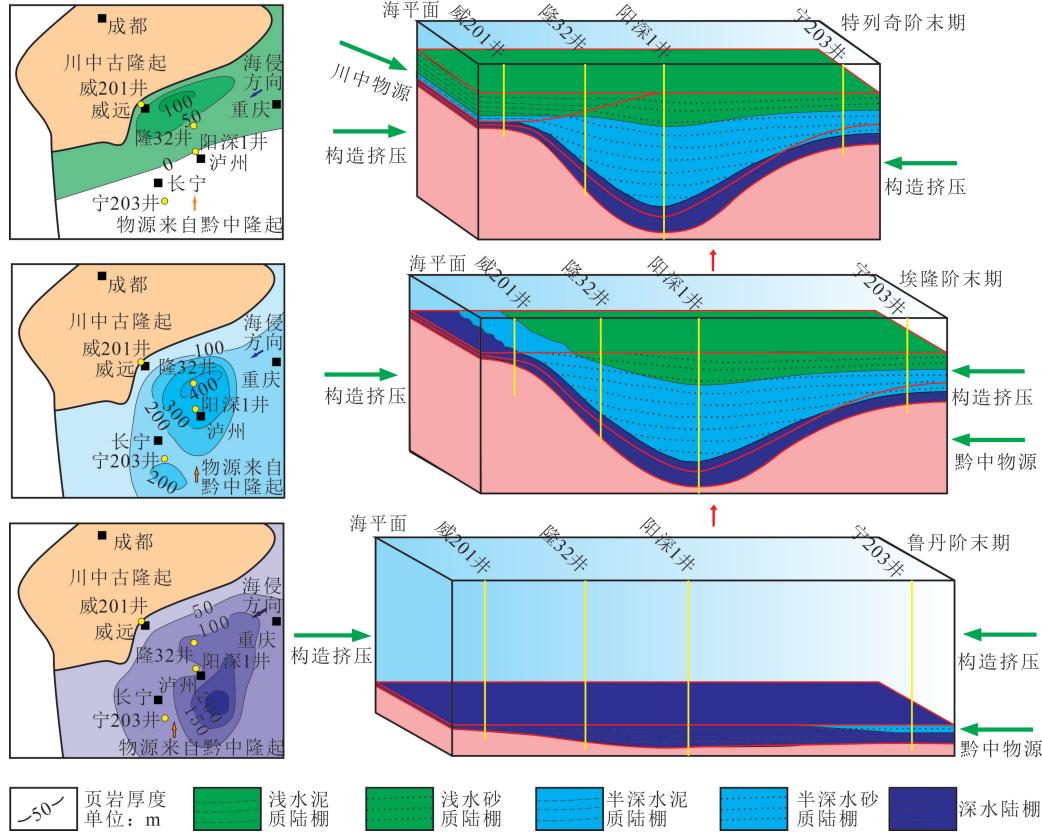


图8 川南地区下志留统龙马溪组页岩沉积模式

Fig. 8 Facies model of Lower Silurian Longmaxi shale in southern Sichuan area

## 4 结 论

(1)根据笔石分带特征,威远地区龙马溪组经历了鲁丹阶、埃隆阶和特列奇阶3个时期的沉积,长宁地区缺少特列奇阶特征化石,只发育鲁丹阶和埃隆阶两个时期的沉积。

(2)将龙马溪组页岩按颜色、岩性、粒度及含化石情况划分为笔石页岩相、碳质页岩相、硅质页岩相、钙质页岩相、泥质灰岩相、粉砂质页岩相以及黏土岩相7种岩相类型。

(3)沉积相分布在区域上具有较大差异。在威远地区经历了3期沉积,发育深水钙质陆棚亚

相、半深水泥质陆棚亚相和浅水泥质陆棚亚相;长宁地区经历了2期沉积,发育浅水砂质陆棚亚相、半深水砂质陆棚亚相和深水碳质陆棚亚相;龙马溪组页岩的沉积演化受到古沉积环境及构造演化的影响,沉积特征区域变化较大,沉积中心向北逐渐迁移。

(4)川南地区受古沉积环境和古构造演化的影响,龙马溪组页岩在岩相、沉积亚相分布上具有较大差异,表现出极强的非均质性,深水陆棚亚相沉积为页岩气富集的最有利沉积相带。

**致谢** 感谢中国石油勘探开发研究院张师本老师在笔石种类鉴定中给予的指导和帮助。

## 参考文献:

- [1] 郭英海,李壮福,李大华,等.四川地区早志留世岩相古地理[J].古地理学报,2004,6(1):20-29.  
GUO Yinghai, LI Zhuangfu, LI Dahua, et al. Lithofacies palaeogeography of the Early Silurian in Sichuan area [J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(1): 20-29.
- [2] 梁狄刚,郭彤楼,边立曾,等.中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(三):南方四套区域性海相烃源岩的沉积相及发育的控制因素[J].海相油气地质,2009,14(2):1-19.  
LIANG Digang, GUO Tonglou, BIAN Lizeng, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (Part 3): controlling factors on the sedimentary facies and development of Palaeozoic marine source rocks [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2009, 14(2): 1-19.
- [3] 牟传龙,王秀平,王启宇,等.川南及邻区下志留统龙马溪组下段沉积相与页岩气地质条件的关系[J].古地理学报,2016,18(3):457-472.  
MOU Chuanlong, WANG Xiuping, WANG Qiyu, et al. Relationship between sedimentary facies and shale gas geological conditions of the Lower Silurian Longmaxi Formation in southern Sichuan Basin and its adjacent areas [J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(3): 457-472.
- [4] 王同,杨克明,熊亮,等.川南地区五峰组—龙马溪组页岩层序地层及其对储层的控制[J].石油学报,2015,36(8):915-925.  
WANG Tong, YANG Keming, XIONG Liang, et al. Shale sequence stratigraphy of Wufeng-Longmaxi Formation in southern Sichuan and their control on reservoirs [J]. Acta Petroleii Sinica, 2015, 36(8): 915-925.
- [5] 王冠平,朱彤,王红亮,等.海相页岩综合层序地层划分及垂向分布特征:以川东南地区五峰组—龙马溪组为例[J].沉积学报,2019,37(2):330-344.  
WANG Guanping, ZHU Tong, WANG Hongliang, et al. Integrated sequence stratigraphic division and vertical distribution characteristics of marine shale: a case study of Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Southeast Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(2): 330-344.
- [6] 王玉满,董大忠,李新景,等.四川盆地及其周缘下志留统龙马溪组层序与沉积特征[J].天然气工业,2015,35(3):12-21.  
WANG Yuman, DONG Dazhong, LI Xinjing, et al. Stratigraphic sequence and sedimentary characteristics of Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its peripheral areas [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(3): 12-21.
- [7] 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.
- [8] 聂海宽,金之钧,马鑫,等.四川盆地及邻区上奥陶统五峰组一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 Petroleii Sinica, 2017, 38(2): 160-174.
- [9] 刘树根,马文辛,LUBA Jansa,等.四川盆地东部地区下志留统龙马溪组页岩储层特征[J].岩石学报,2011,27(8):2239-2252.  
LIU Shugen, MA Wenxin, LUBA Jansa, et al. Characteristics of the shale gas reservoir rocks in the Lower Silurian Longmaxi Formation, East Sichuan Basin, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2239-2252.
- [10] 王兰生,李宗银,沈平,等.四川盆地东部大中型气藏成烃条件分析[J].天然气地球科学,2004,15(6):567-571.  
WANG Lansheng, LI Zongyin, SHEN Ping, et al. On the hydrocarbon generation conditions of the large and middle scale gas fields in eastern part of Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(6): 567-571.
- [11] 黄文明,刘树根,马文辛,等.深层海相碳酸盐岩优质储层的形成、保存和破坏机制:以四川盆地震旦系—志留系为例[J].地质科学,2011,46(3):875-895.  
HUANG Wenming, LIU Shugen, MA Wenxin, et al. Formation, preservation and mechanism of marine deep carbonate high quality reservoir rocks: illustrated by Sinian to Silurian system in Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(3): 875-895.
- [12] 张海全,余谦,李玉喜,等.中上扬子区下志留统页岩气勘探潜力[J].新疆石油地质,2011,32(4):353-355.  
ZHANG Haiquan, YU Qian, LI Yuxi, et al. Exploratory prospect of shale gas of lower Silurian in middle-upper Yangtze area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(4): 353-355.
- [13] 王玉满,董大忠,李建忠,等.川南下志留统龙马溪组页岩气储层特征[J].石油学报,2012,33(4):551-

- 561.
- WANG Yuman, DONG Dazhong, LI Jianzhong, et al. Reservoir characteristics of shale gas in Longmaxi Formation of Lower Silurian, southern Sichuan [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(4): 551-561.
- [14] 莫杰. 地质年代简介奥陶纪、志留纪[J]. 地质与勘探, 1980(5): 39-40.
- MO Jie. Geological age Ordovician, Silurian [J]. *Geology and Prospecting*, 1980(5): 39-40.
- [15] 张元动,陈旭. 奥陶纪笔石动物的多样性演变与环境背景[J]. 中国科学(地球科学), 2008, 38(1): 10-21.
- ZHANG Yuandong, CHEN Xu. Diversity history of Ordovician graptolites and its relationship with environmental change [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2008, 38(1): 10-21.
- [16] 陈旭. 论笔石的深度分带[J]. 古生物学报, 1990, 29(5): 507-526.
- CHEN Xu. Graptolite depth zonation [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1990, 29(5): 507-526.
- [17] 陈旭. 英国奥陶纪和志留纪笔石带的最新划分方案[J]. 地层学杂志, 2010, 34(2): 161-164.
- CHEN Xu. An introduction to the new classification of the British Ordovician and Silurian graptolite biozonation [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2010, 34(2): 161-164.
- [18] 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 Ordovicia-Silurian Lungmachi black shales in South China [J]. *Science China: Earth Science*, 2012, 42(1): 130-139.
- [19] 李天生. 四川盆地志留系生油层主要地质特征[J]. 矿物岩石, 1991, 11(3): 80-87.
- LI Tiansheng. The principal geological feature of oil-forming formation in Sichuan Basin [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1991, 11(3): 80-87.
- [20] 朱志军,陈洪德,林良彪,等. 黔北—川东南志留系层序格架下的沉积体系演化特征及有利区带预测[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 243-253.
- ZHU Zhijun, CHEN Hongde, LIN Liangbiao, et al. Depositional system evolution characteristics in the framework of sequences of Silurian and prediction of favorable zones in the Northern Guizhou—Southeastern Sichuan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(2): 243-253.
- [21] JOHNSON M E, RONG Jiayu, YANG Xuechang. International correlation by sea-level events in the Early Silurian of North America and China (Yangtze Platform) [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1985, 96(1): 1384-1397.
- [22] 陈建强,李志明,龚淑云,等. 上扬子地区志留纪层序地层特征[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 58-65.
- CHEN Jianqiang, LI Zhiming, GONG Shuyun, et al. Silurian sequence stratigraphy of upper Yangtze Region, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 58-65.
- [23] 刘宝琨,许效松,潘杏南,等. 中国南方古大陆沉积地壳演化与成矿[M]. 北京:科学出版社, 1993: 129.
- [24] 张春明,张维生,郭英海. 川东南—黔北地区龙马溪组沉积环境及对烃源岩的影响[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 136-145.
- ZHANG Chunming, ZHANG Weisheng, GUO Yinghai. Sedimentary environment and its effect on hydrocarbon source of Longmaxi Formation in southeast Sichuan and north Guizhou, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 136-145.

(编辑 徐会永)