

引用: 包汉勇, 赵帅, 王必金, 等. 川东红星地区二叠系茅口组页岩气勘探突破及富集主控因素[J]. 中国石油勘探, 2024,29(1):65-75.

Bao Hanyong, Zhao Shuai, Wang Bijin, et al. Exploration breakthrough and main controlling factors for shale gas enrichment in the Permian Maokou Formation in Hongxing area in eastern Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2024,29(1):65-75.

# 川东红星地区二叠系茅口组页岩气勘探突破及富集主控因素

包汉勇<sup>1</sup> 赵帅<sup>1</sup> 王必金<sup>2</sup> 郭战峰<sup>2</sup> 刘皓天<sup>1</sup> 张莉<sup>1</sup> 朱志芳<sup>3</sup>

(1 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院; 2 中国石化江汉油田分公司; 3 中国石化江汉油田分公司工程院)

**摘要:** 四川盆地二叠系页岩气具有良好的成藏条件和勘探潜力, 继二叠系吴家坪组获得勘探突破后, 将低勘探程度层系——茅口组“高灰”页岩气作为重要的勘探接替方向。利用 HYM-1 等井的岩心、测录井和分析化验资料, 系统开展茅口组页岩气藏条件与富集特征的研究, 认为茅口组四段一亚段页岩具有高碳、高灰、高孔隙度、高含气性、高杨氏模量、薄储层、多夹层的“五高一薄一多”的典型地质特征; 与五峰组—龙马溪组等页岩相比, 茅四段页岩碳酸盐矿物含量更高、黏土矿物含量更低, 储集空间类型以有机质孔为主, 无机孔较少, 孔隙度平均 4.27%, 整体表现为高孔隙度; 茅四段一亚段平均含气量为 4.96m<sup>3</sup>/t, 具备较高的含气量。综合分析认为, 富藻高碳页岩的发育、良好的储集能力和保存条件, 以及页岩储层的可压裂性, 是茅四段页岩气富集高产的主控因素。

**关键词:** 四川盆地; 川东红星地区; 二叠系; 茅口组; 海相页岩; 地质特征; 富集控制因素

中图分类号: TE112.22

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2024.01.005

## Exploration breakthrough and main controlling factors for shale gas enrichment in the Permian Maokou Formation in Hongxing area in eastern Sichuan Basin

Bao Hanyong<sup>1</sup>, Zhao Shuai<sup>1</sup>, Wang Bijin<sup>2</sup>, Guo Zhanfeng<sup>2</sup>, Liu Haotian<sup>1</sup>, Zhang Li<sup>1</sup>, Zhu Zhifang<sup>3</sup>

(1 Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Jiangnan Oilfield Company; 2 Sinopec Jiangnan Oilfield Company;  
3 Research Institute of Petroleum Engineering Technology, Sinopec Jiangnan Oilfield Company)

**Abstract:** The Permian shale gas in Sichuan Basin shows good hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential. After obtaining breakthrough in the Permian Wujaping Formation, the “high lime content” shale gas in Maokou Formation with a low degree of exploration has been regarded as a major orientation for exploration and replacement. The core samples, wireline and mud logging and experimental data in Well HYM-1 are used to systematically analyze the shale gas accumulation conditions and enrichment characteristics in Maokou Formation, and the study results indicate that the shale in the first sub-member of the fourth member of Maokou Formation has the typical geological characteristics of “five highs, one thin and one multiple”, i.e., high carbon content, high lime content, high porosity, high gas content, high Yong’s modulus, thin reservoirs, and multiple interbeds; Compared with the shale in Wufeng-Longmaxi Formation, Maokou Formation shale has a higher carbonate mineral content but a lower clay content, and the reservoir space is dominated by organic pores, with few inorganic pores, and an average porosity of 4.27%, showing high porosity as a whole; The average gas content of the first sub-member of the fourth member of Maokou Formation is 4.96m<sup>3</sup>/t, which shows a high gas content. The comprehensive analysis indicates that the development of algal-rich and high-carbon shale, good storage capacity and preservation conditions, as well as the good fracability of shale reservoir are the main controlling factors for the enrichment and high-yield production of shale gas in the fourth member of Maokou Formation.

**Key words:** Sichuan Basin, Hongxing area in eastern Sichuan Basin, Permian, Maokou Formation, marine shale, geological characteristics, controlling factors for gas enrichment

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科研项目“红星—宜昌常压页岩气富集高产机理与目标评价”(P21087-2), “川东地区重点层系页岩气成藏条件与评价技术研究”(P23077)。

第一作者简介: 包汉勇(1981—), 男, 湖南岳阳人, 博士, 2011年毕业于同济大学地质学专业, 研究员, 现主要从事油气勘探开发工作。

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: baohy.jhyt@sinopec.com

收稿日期: 2023-09-15; 修改日期: 2024-01-09

## 0 引言

二叠系是美国页岩油气勘探开发主力层系,近年来仅二叠盆地 Wolfcamp 组等页岩油产量就占了全美油气量的近 1/3。二叠系也是我国华南地区油气勘探开发的重点层系,20 世纪 70 年代,在川东发现了我国第一个二叠系生物礁气藏——建南长兴组生物礁滩气藏,随后又在川东、川东北、川中等地区发现了 8 个含气层组、6 种类型的气藏。特别是近年来,随着页岩气勘探理论、地质评价及工程工艺技术等的快速发展,华南地区二叠系页岩气相继在吴家坪组、大隆组取得勘探突破<sup>[1-2]</sup>,但是,对于二叠系茅口组页岩气的勘探,因普遍认为该组沉积时,构造活跃<sup>[3-6]</sup>,海平面频繁波动,沉积相变快<sup>[7-13]</sup>,地层厚度薄且灰质含量过高导致生烃潜力、赋存方式和富集机理等认识不清,因此茅口组页岩气的勘探一直未取得实质性突破。

中国石化针对二叠系吴家坪组吴二段已经部署了多口探井(HY-1 井、HY-2 井、HY-3 井等),

试气后均取得了较高的工业气流。在此基础上,积极拓展二叠系页岩气勘探成果,打开立体勘探的局面,近年持续开展了茅口组页岩气勘探潜力评价及目标优选。2022 年,针对川东页岩品质较好、构造变形较弱的石柱复向斜带红星地区茅四段页岩<sup>[14]</sup>,部署了风险探井 HYM-1 井。2023 年 8 月 3 日,放喷测试获得日产  $6.45 \times 10^4 \text{m}^3$  的工业气流,实现了我国二叠系茅口组页岩气勘探的重大突破,不仅扩展了页岩气勘探新领域,更标志着我国在多层系、多类型页岩气立体勘探上迈出了重大一步。

## 1 红星地区茅四段页岩地质特征

通过岩心、测井、岩石物理资料等分析,与已经规模开发的涪陵五峰组—龙马溪组页岩相比,川东红星地区茅四段页岩具备高碳、高灰、高孔隙度、高含气性、高杨氏模量、薄储层、多夹层的“五高一薄一多”的典型地质特征,是一种新型海相页岩储层(表 1)。

表 1 红星地区与涪陵地区页岩特征综合对比表

Table 1 Comprehensive comparison of shale characteristics between that in Hongxing area and Fuling area

井名	层位	优质页岩厚度 /m	TOC / %	孔隙度 / %	含气量 / ( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	脆性矿物含量 / %	杨氏模量 / GPa	岩性组合特征
HYM-1	茅四段一亚段	26.5	6.95	4.27	4.96	96.25	53.76	页岩夹薄层石灰岩,石灰岩厚度一般在 5cm 以下
焦页 1	五峰组—龙马溪组	89.0	3.77	4.65	2.96	62.40	41.10	厚层页岩,连续发育

### 1.1 地层与沉积特征

川东二叠系与下伏的泥盆系—石炭系呈平行不整合接触,上覆地层为三叠系飞仙关组<sup>[1]</sup>。红星地区位于川东石柱复向斜东北部,研究区内二叠系保存完整,自下而上发育梁山组、栖霞组、茅口组、吴家坪组和长兴组(图 1),其中茅口组与吴家坪组以东吴面不整合接触<sup>[15-17]</sup>。茅口组纵向上可划分为 4 个段(茅一段、茅二段、茅三段及茅四段),富有机质页岩主要发育在茅四段一亚段,该亚段岩性以灰质页岩夹薄层石灰岩为主<sup>[18-20]</sup>,厚度为 4.1~26.5m。红星地区茅四段一亚段具有南厚北薄特点,南部页岩厚度普遍大于 14m,与已经商业开发的五峰组—龙马溪组页岩厚度普遍在 60~120m 相比<sup>[21-23]</sup>,优质页岩厚度明显偏薄。

以 HYM-1 井为例,依据典型的岩电特征可将

茅四段一亚段进一步划分为 5 个小层(图 2)。由下至上,①小层厚度为 2.4m,主要发育灰质页岩,电性特征上具有中高自然伽马、高电阻率、高声波时差、高中子、低密度的典型特征;②小层厚度为 3.5m,主要发育含灰碳质页岩及碳质页岩,表现为中高自然伽马、高电阻率、高声波时差、中高中子、低密度;③小层厚度为 5.5m,主要发育碳质页岩及含硅碳质页岩,具有高自然伽马、低电阻率、高声波时差、高中子、低密度的特征;④小层厚度为 7.7m,主要发育含灰碳质页岩,具有中高自然伽马、低电阻率、高声波时差、中高中子、低密度;⑤小层厚度为 7.3m,主要发育灰质页岩,具有低自然伽马、低电阻率、高声波时差、低中子、低密度的特征。

沉积演化表明,茅四段一亚段主要经历了 1 期沉积旋回(图 2),海侵期发生在茅三段沉积晚期—茅四段一亚段沉积早期(①—③小层),③小层沉积时

水体最深，对应最大海泛面附近。海退期发生在茅四段一亚段沉积晚期（④—⑤小层）—茅四段二亚段沉积期。沉积环境上，①—②小层介壳化石较为发育，向上至③小层，介壳发育减少而菊石则频繁出现，表明水体由浅至深的变化；④小层中出现了明显的硅质

页岩向灰质页岩转变的岩性突变面，向上至⑤小层灰质含量更高。同时介壳与海百合发育，镜下可见有孔虫、苔藓虫化石，对应水深较浅的环境。整体上，茅四段一亚段整体发育斜坡—陆棚相沉积，水体经历由浅至深再到浅的过程。

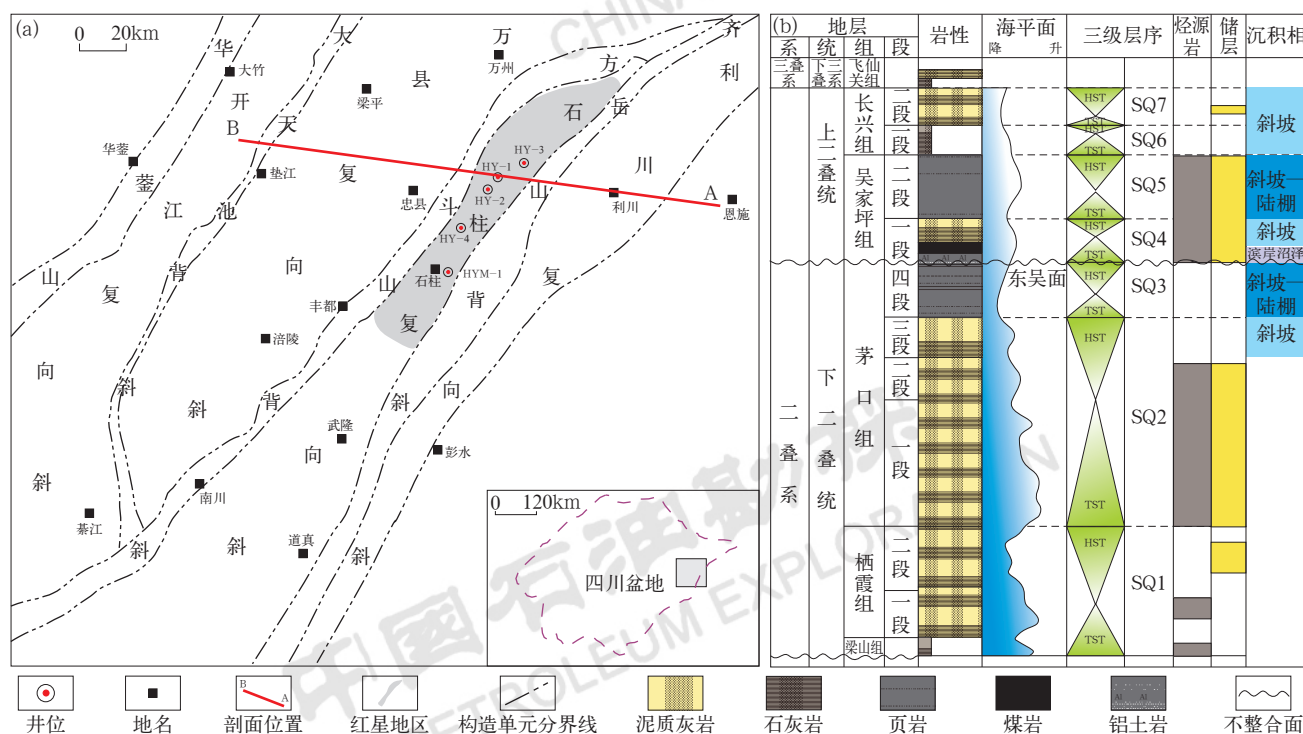


图1 川东地区构造图 (a) 和二叠系综合柱状图 (b) (据文献[14]修改)

Fig.1 Structure division map of eastern Sichuan Basin (a) and comprehensive stratigraphic column of the Permian (b) (modified after reference [14])

## 1.2 地球化学特征

通过开展有机地球化学测试分析，表明红星地区茅四段的显微组分以贫氢次生组分（固体沥青、沥青质体）为主，其次为腐泥组（层状藻和腐泥微粒体）（图3）。纵向上，茅四段的显微组分从③小层开始，至⑤小层，次生组分含量逐渐增高（图4）。

茅四段进行干酪根碳同位素（ $\delta_{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ）镜检显示，主体分布在 $-28\% \sim -26\%$ ，说明茅四段主要的有机质类型为 $\text{II}_1$ 型干酪根<sup>[24-26]</sup>，平面上差异较小（图5）。茅四段一亚段页岩镜质组反射率（ $R_0$ ）在 $1.85\% \sim 2.54\%$ 之间，平均为 $2.34\%$ ，热演化程度适中，处于大量生成干气阶段，是产烃的主要时期。

茅四段一亚段有机碳含量整体大于 $8\%$ ，相较于涪陵志留系海相页岩（有机碳含量平均 $6\%$ ），有显著的“高碳”特征，表明二叠系茅口组页岩储层具备

较大的勘探潜力。

纵向上，③小层有机碳含量最高，①和②小层次之，④和⑤小层最低。猜测普遍的高有机碳含量与产烃率较高的藻类密切相关，而纵向上的差异性则主要与沉积环境及岩性有较大关系。

## 1.3 储集特征

与涪陵地区五峰组—龙马溪组和红星地区吴二段页岩相比，红星地区茅四段一亚段页岩整体具有碳酸盐矿物含量更高、黏土矿物含量更低的特征（图6）。该段页岩碳酸盐矿物含量最高（ $58.5\%$ ），吴家坪组次之（ $21.8\%$ ），而五峰组—龙马溪组最低（ $10\%$ ）。从黏土矿物含量则出现了反向变化，五峰组—龙马溪组最高（ $21\%$ ），吴家坪组次之（ $10\%$ ），茅口组最低（ $4.4\%$ ）。五峰组—龙马溪组主要发育硅质页岩，茅口组则以硅质页岩、钙质页岩为主。



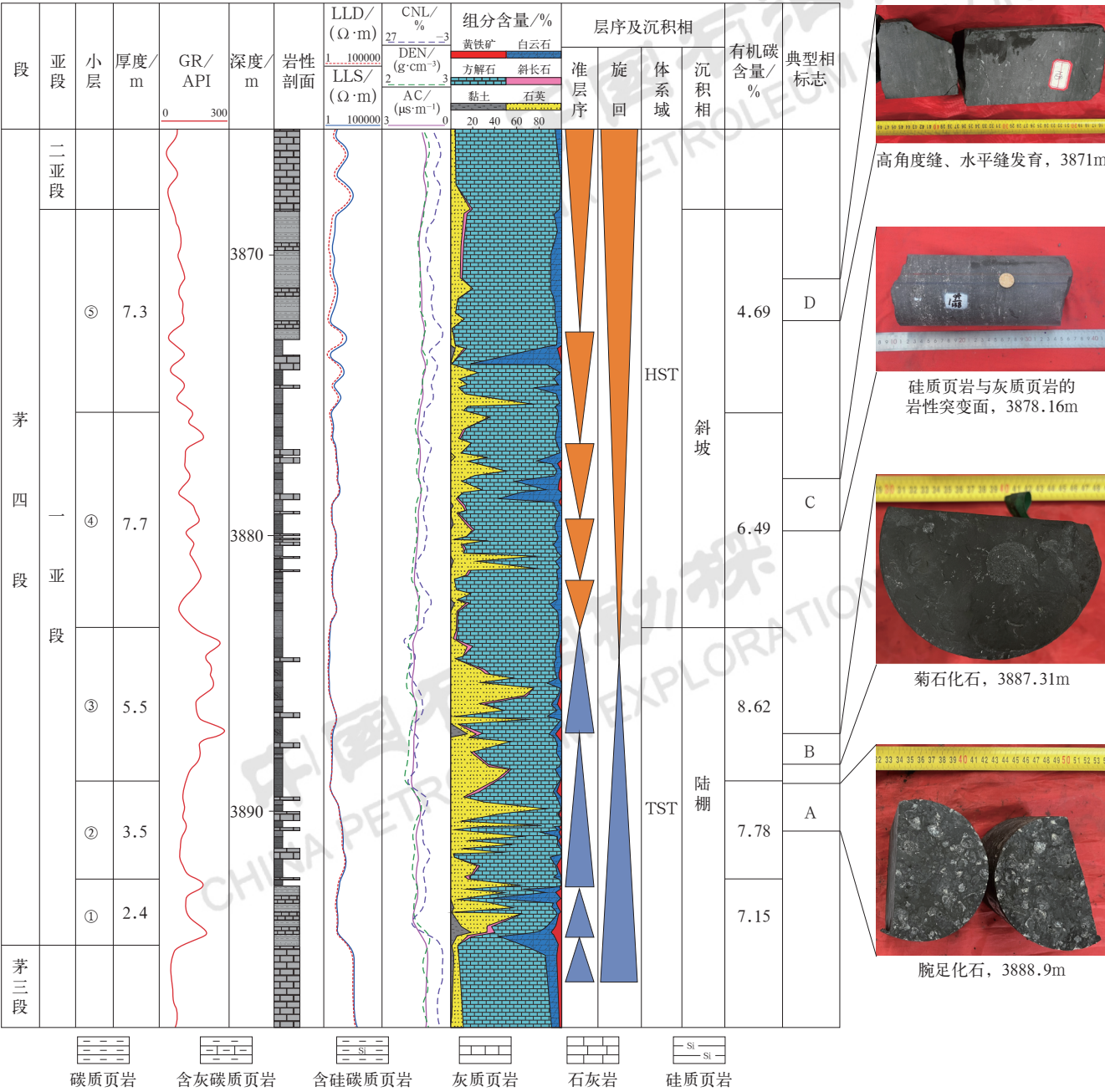


图 2 HYM-1 井茅四段一亚段沉积相柱状图及典型沉积相标志图

Fig.2 Sedimentary facies diagram and typical sedimentary facies markers of the first sub-member of the fourth member of Maokou Formation in Well HYM-1

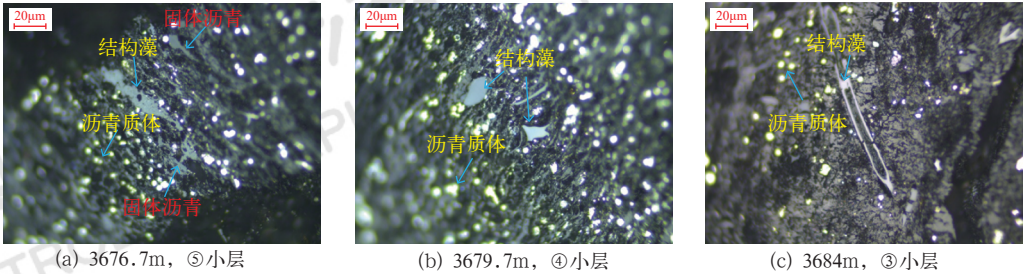


图 3 HY-2 井茅四段一亚段页岩有机显微组分图

Fig.3 Organic maceral of shale in the first sub-member of the fourth member of Maokou Formation in Well HY-2



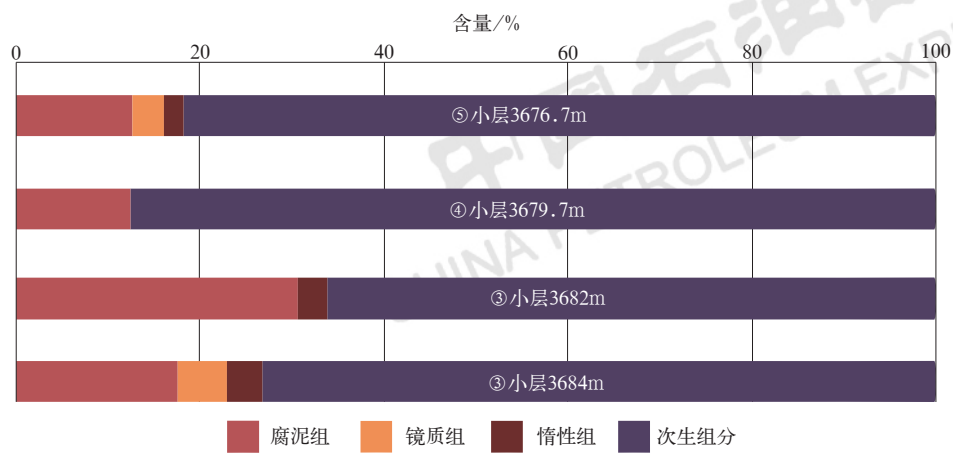


图 4 HY-2 井茅四段一亚段显微组分分布图

Fig.4 Content histogram of the first sub-member of the fourth member of Maokou Formation in Well HY-2

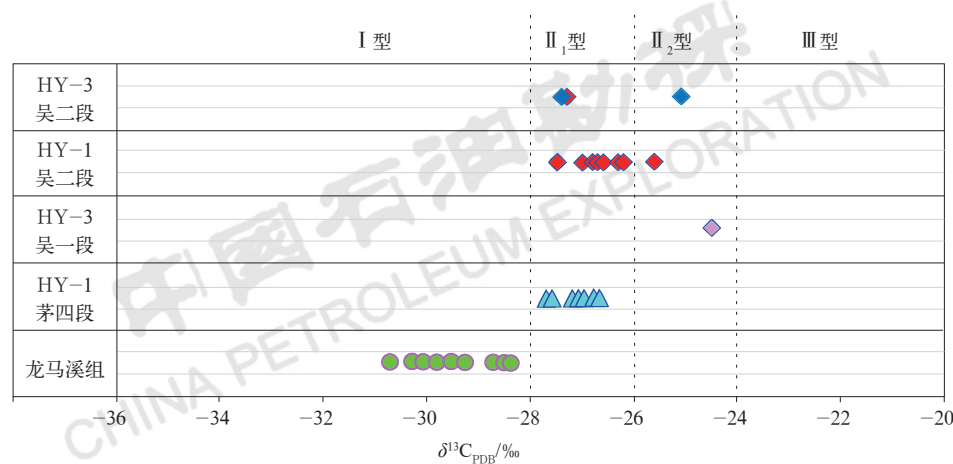


图 5 红星地区二叠系干酪根碳同位素分布图

Fig.5 Kerogen carbon isotope distribution of the Permian in Hongxing area

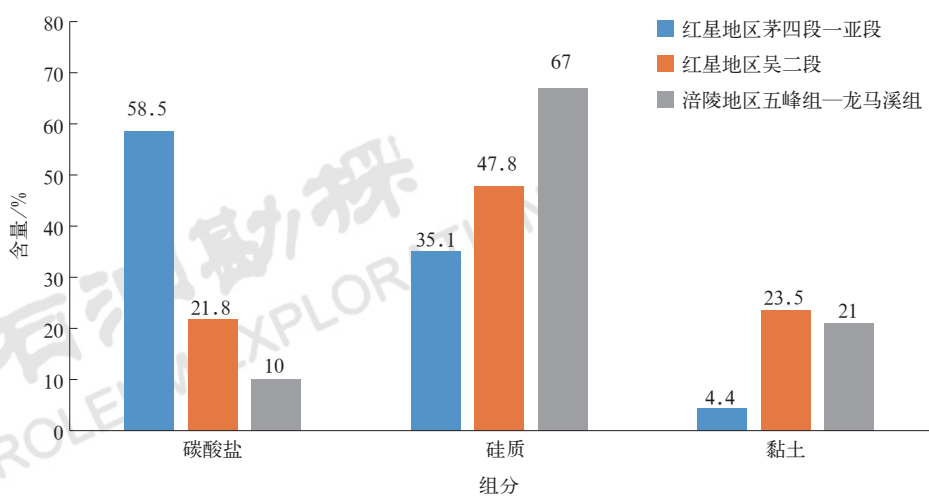


图 6 红星地区与涪陵地区页岩矿物含量对比图

Fig.6 Comparison of shale mineral contents between those in Hongxing area and Fuling area

根据氩离子抛光资料综合分析,茅四段储集空间类型以有机质孔为主,发育大量的粒间有机质孔和粒内有机质孔;无机孔较少,裂缝以贴粒缝、微裂缝等

为主(图7)。孔隙度主要集中在4%~8%之间,平均为4.27%,储集物性好,其中③小层孔隙度最高,平均为5.33%,整体表现为高孔隙度。

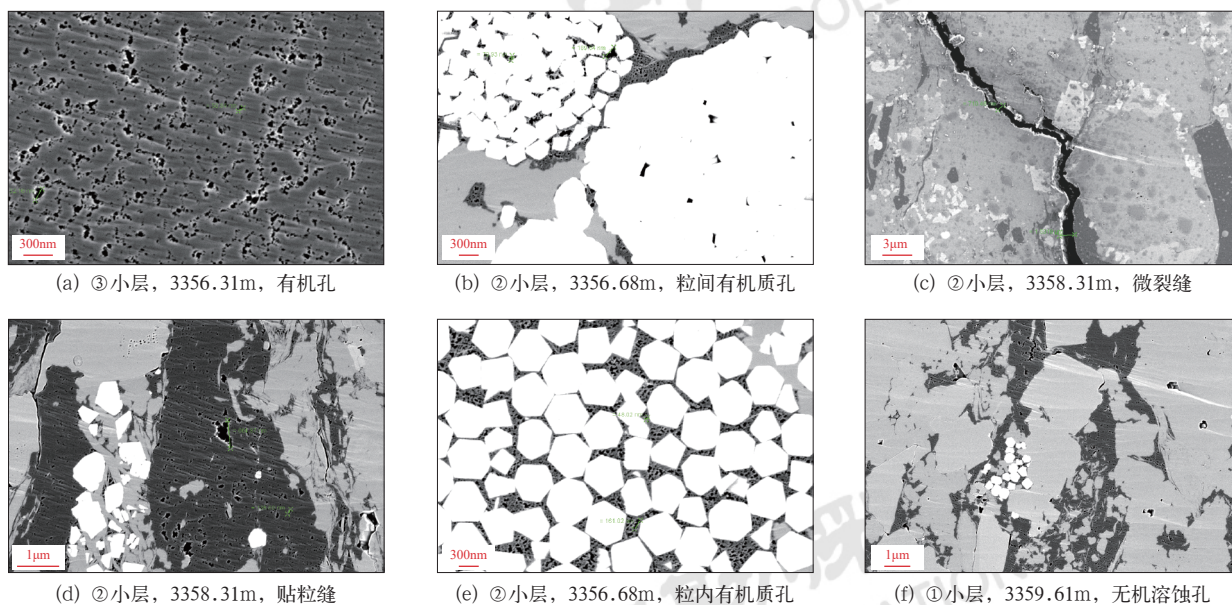


图7 HY-1井茅四段一亚段页岩储集空间类型图

Fig.7 Reservoir space type of shale in the first sub-member of the fourth member of Maokou Formation in Well HY-1

## 1.4 含气性特征

对于页岩气而言,含气性是初步评估泥页岩是否具有勘探价值的最直接参数<sup>[7]</sup>。对比红星地区多口探井,均在茅四段页岩层段钻遇良好的气测显示,平均含气量为4.45~7.10m<sup>3</sup>/t,具备较高的含气量。红星地区HYM-1井浸水试验中大量气泡快速连续上涌,实测HYM-1井茅四段一亚段含气量为2.62~7.38m<sup>3</sup>/t,平均为4.96m<sup>3</sup>/t;其中③小层最好,为7.38m<sup>3</sup>/t(表2)。

## 2 茅口组页岩气富集高产主控因素

通过开展红星地区茅口组页岩气富集高产主控因

素的系统综合分析,初步明确了富藻高碳页岩发育是富集的基础,有机—无机协同是富集的重要前提,良好的保存条件是富集的关键因素,页岩储层的可压裂性是高产的重要保障。

### 2.1 富藻高碳页岩发育是富集的基础

富藻高碳页岩的形成与有利沉积相带的发育分布密不可分。基于全球性事件沉积与区域微量、稀土元素等多参数联合对比分析(图8),明确上升洋流—热液共同作用对红星地区具有重要影响,而茅四段沉积早期最为明显。上升洋流—热液带来缺氧和富含营养的海流,P、Ni等营养元素富集,使得茅四段硅质生物繁盛,同时也增加了水中氧的消耗,形成了极

表2 红星地区HYM-1井茅四段一亚段含气量统计表

Table 2 Statistics of total gas content in the first sub-member of the fourth member of Maokou Formation in Well HYM-1

层段	解析气平均含量 / (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	损失气平均含量 / (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	平均含气量 / (m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	样品数
⑤	1.22	1.05	2.62	8
④	2.03	2.85	4.83	11
③	3.42	4.68	7.38	7
②	1.89	3.2	4.64	4
①	1.77	3.34	5.31	3

度缺氧的水体。受上升洋流影响，茅四段生物繁盛，以硅质放射虫、有孔虫、菊石等生物为主，为有机质的富集提供了丰富的物质基础。高的生产力、高度缺氧的水体环境，有利于有机质的高度富集和保存。综上所述，川东红星地区二叠系茅四段页岩高有机碳

成因是由上升流—热液共同影响的（图 9），这也说明地质事件在很大程度上影响着富藻高碳页岩的发育模式。而斜坡—陆棚相发育的富藻高碳页岩，打破了前期海相优质页岩有利相带只有深水陆棚相的认识。

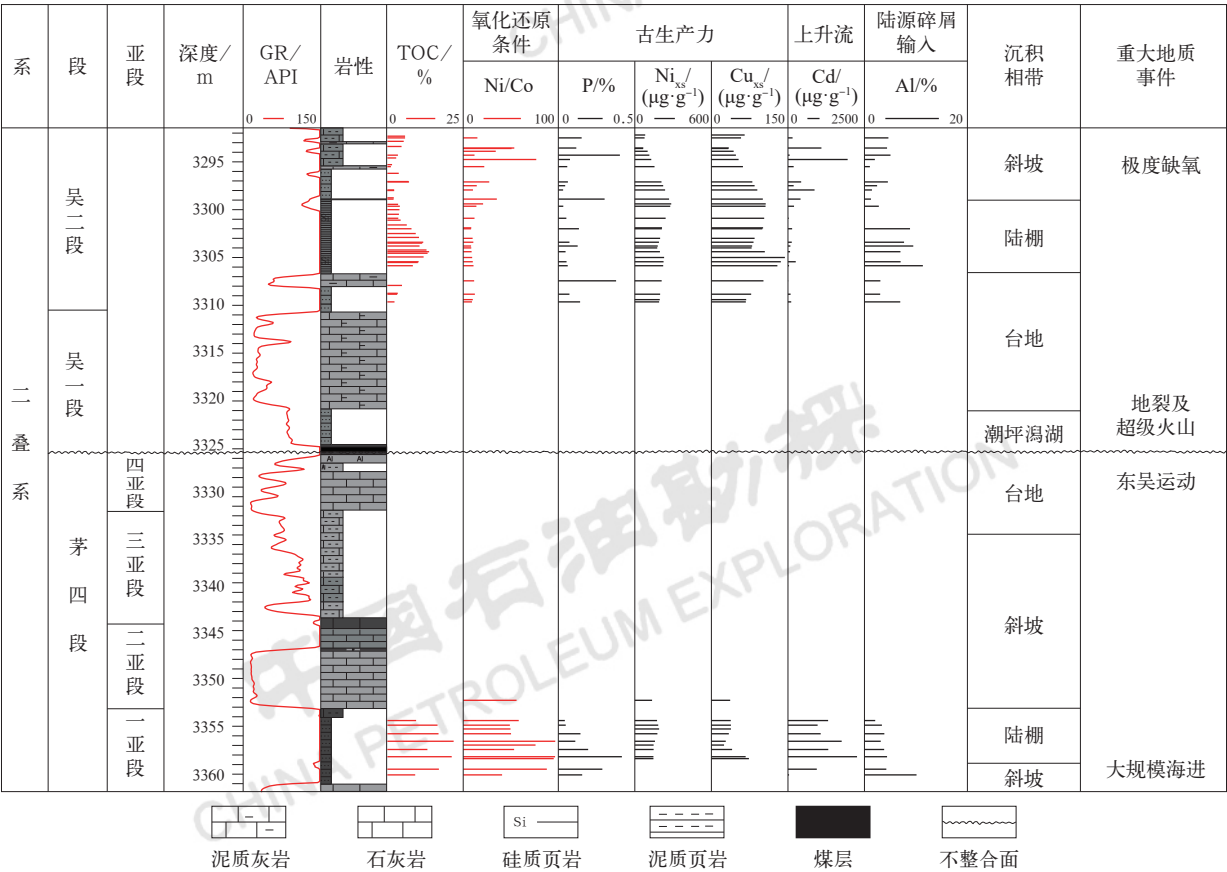


图 8 HY-1 井二叠系茅口组—吴家坪组页岩古生产力与沉积环境综合柱状图

Fig.8 Comprehensive column of shale paleo-productivity in the Permian Maokou-Wujiaping Formation and sedimentary environments in Well HY-1

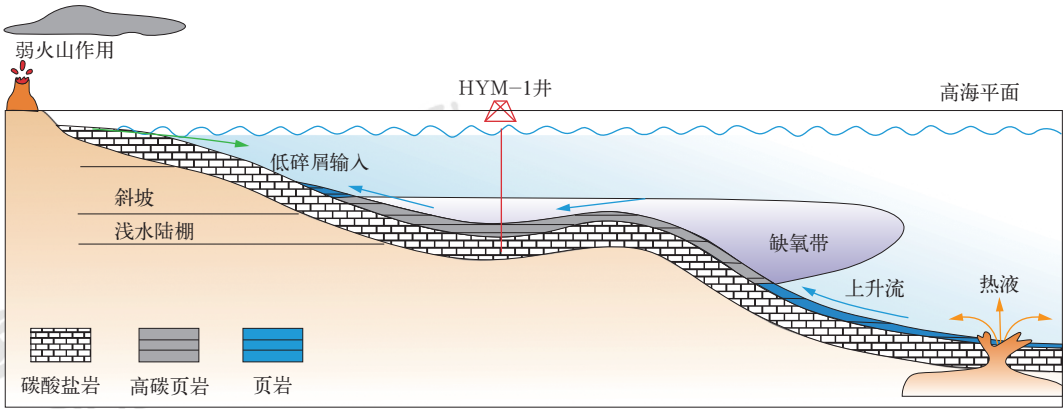


图 9 川东二叠系茅四段斜坡—陆棚相高碳页岩分布模式图

Fig.9 Distribution pattern of high-carbon shale of shope-continental shelf facies in the fourth member of the Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin



虽然有利的发育相带是页岩气富集的前提,但二叠系茅口组的生物也是有机质富集的重要因素。通过成烃生物识别,二叠系的成烃生物主要为层状藻(图10),其生烃能力远高于高等植物等,这也是二叠系发育高碳页岩的重要原因。

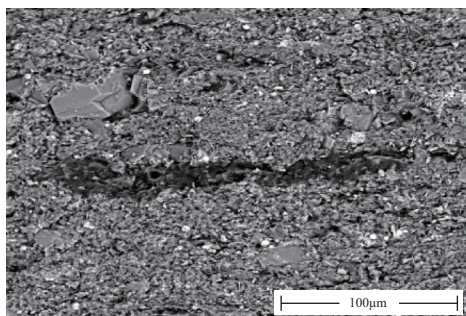


图10 HYM-1井二叠系层状藻观察图

Fig.10 SEM image of laminated algae in the Permian in Well HYM-1

深入研究后发现,茅四段有机碳含量与沉积相带相关性较强,陆棚和下斜坡有机碳含量高,上斜坡—台地相相对较低(图11)。所以川东地区的斜

坡—陆棚相带是二叠系茅口组富碳页岩发育的有利相带。

## 2.2 有机—无机协同是富集的重要前提

在红星地区茅四段页岩具备较强的生烃能力基础之上,孔隙发育程度决定了页岩储集能力的大小,而有机质含量和比表面积是决定页岩吸附能力的关键因素<sup>[2]</sup>。以HYM-1井为例,压汞—液氮吸附联测结果显示,茅四段页岩的孔隙结构以微孔及介孔为主,BET比表面积平均为 $5.63\text{m}^2/\text{g}$ ,孔隙类型以有机质孔为主,其中茅四段一亚段①至③小层有机质孔含量相对较高,③小层的有机质孔最多,伴随少量的无机孔、贴粒缝及微裂缝,其中靶窗层段③小层的有机质面孔率高达 $7.96\%\sim 14.47\%$ 。通过开展氩离子抛光分析深入研究,发现茅四段的有机质孔之间连通性较强,极易形成页岩气富集通道。同时在对TOC与有机质孔进行相关性研究后发现,两者呈现极好的正相关性。综合研究认为,川东红星地区二叠系茅四段微孔及介孔发育、有机质孔占比高、比表面积大、孔隙连通性强、吸附能力较强,具有较好的含气性。

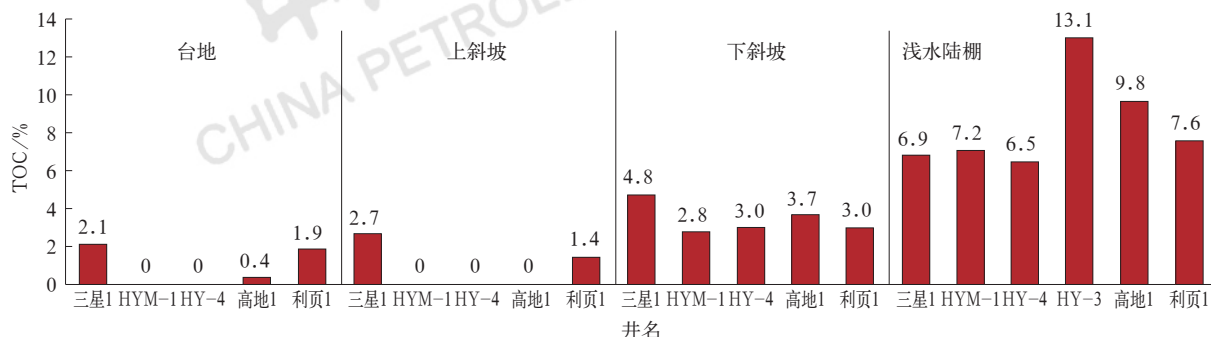


图11 川东红星地区茅四段不同相带有机碳含量统计图

Fig.11 TOC histogram of shale in different facies zones in the fourth member of Maokou Formation in Hongxing area, eastern Sichuan Basin

## 2.3 良好的保存条件是页岩气富集的关键

华南地区整体构造变形位极其复杂,除了要充分考虑页岩的生储条件,还要系统评价页岩气的保存条件<sup>[27-30]</sup>。川东红星地区在茅口组沉积末期由于东吴运动遭受了大规模的构造抬升,使得茅四段被大范围剥蚀。事实上除红星地区外,川东其他地区二叠系保存条件较为一般,特别是鄂西一带。

川东及周缘地区构造上位于中扬子西部湘鄂西断

褶带和川东高陡褶皱带,构造具“多层滑脱、递进变形”的特征,自西向东可划分多个次级构造单元;受构造形变差异性影响,川东地区二叠系广泛分布,宜恩地区二叠系主要残存于向斜区。红星地区整体位于石柱复向斜,构造主要呈北东—北东东向“S”形展布,发育三排呈雁列式排列的正向构造。红星地区大型断裂发育较少,基本均为小型断裂(图12)<sup>[14]</sup>,所以研究区保存条件相对有利,这给页岩气的富集奠定了重要基础。

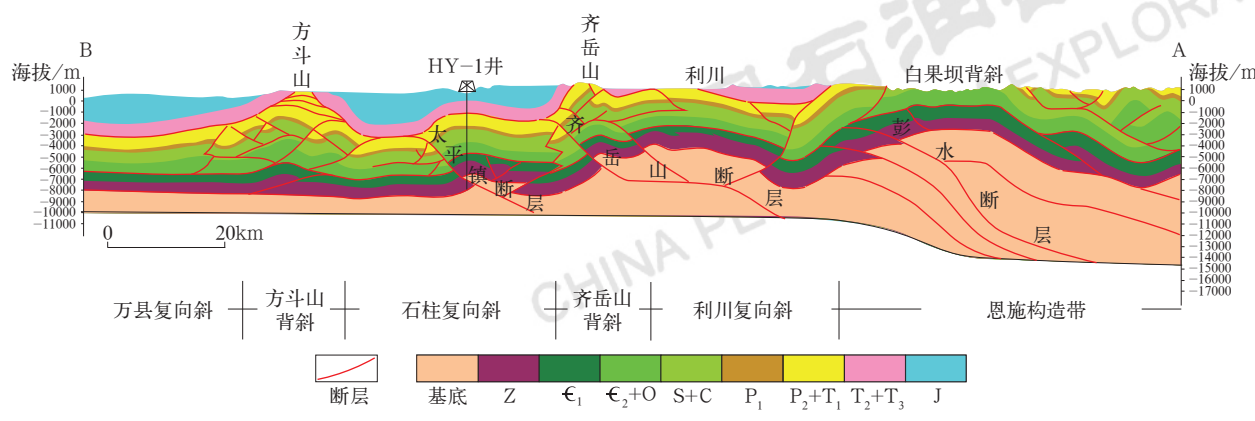


图 12 红星及周边地区构造剖面图 (剖面位置见图 1)  
Fig.12 Structural section in Hongxing and surrounding areas (section location is in Fig.1)

2.4 页岩储层的可压裂性是高产的重要保障

红星地区茅四段一亚段页岩的破裂压力、脆性指数、最小水平主应力等参数，整体高于吴二段，应力差异系数和泊松比与吴二段基本相当，随着埋深增大，破裂压力逐渐增高（表 3）。HYM-1 井茅四段一亚段与吴二段相比，黏土矿物含量低、碳酸盐矿物含量高，长英质含量基本相当，脆

性矿物含量均较高。其中。吴二段靶窗层段③小层黏土矿物含量为 17.8%~23.5%，硅质矿物含量为 47.6%~51.3%，碳酸盐矿物含量为 17.6%~25.2%，茅四段一亚段靶窗层段③小层黏土矿物含量为 0.5%~7.33%，硅质矿物含量为 26.8%~54.3%，碳酸盐矿物含量为 27%~71.8%。所以从脆性矿物含量及岩石力学特征上来看，茅四段一亚段具备更好的可压裂性。

表 3 红星地区岩石物理参数对比表  
Table 3 Comparison of petrophysical parameters in Hongxing area

井名	段	小层	厚度 /m	杨氏模量 /GPa	泊松比	破裂压力 /MPa	脆性指数 /%	最小主应力 /MPa	应力差异系数
HYM-1	茅四段一亚段	⑤	7.37	63.12	0.28	105.51	61.62	87.05	0.22
		④	7.72	54.34	0.25	99.08	62.84	83.84	0.21
		③	5.50	44.06	0.23	95.09	60.15	81.70	0.19
		②	3.52	51.98	0.23	95.52	66.73	82.19	0.21
		①	2.39	55.30	0.20	91.57	75.55	80.49	0.23
HY-1	吴二段	⑤	5.10	53.63	0.19	88.07	57.40	79.81	0.22
		④	3.50	50.26	0.19	88.18	55.29	74.34	0.21
		③	6.70	41.05	0.21	88.63	50.33	70.19	0.21
		②	1.30	73.47	0.26	94.07	70.81	87.56	0.19
		①	2.50	53.17	0.22	90.41	53.74	78.07	0.21

3 茅口组页岩勘探突破重要启示

茅口组页岩在华南地区广泛分布，具备良好的勘探前景。根据前期涪陵地区页岩气的开采经验，硅质页岩储层具备较高的含气性，是优质的页岩储层。但是，红星地区二叠系茅口组一亚段的“高灰”页岩在可压性上比硅质页岩效果更好，并且有机碳含量高，综合来看在储层评价方面甚至大幅度优于涪

陵地区五峰组—龙马溪组。这在一定程度上改变了对海相页岩的固有认识，即除了传统的硅质页岩之外，其他多矿物组成的页岩，如灰质页岩、云质页岩等，也能成为优质储层。在后期勘探开发过程中，应进行储层精细表征，利用地质—工程一体化深入研究，明确地质—工程双甜点<sup>[31-32]</sup>，力争取得页岩气勘探的新突破。

针对具有“五高一薄一多”的典型地质特征的新

型海相页岩储层,初步形成了“少簇聚能+复合暂堵+高强度铺置”核心压裂理念。在油气评价开发阶段,也应基于地质—工程一体化理念,继续深化针对该类储层的储层改造工艺研究,例如强化增产机理研究,充分考虑高碳、高灰特征,结合酸处理与加砂压裂优势,通过探索复合加砂酸压工艺,提高储层改造效果,从而形成精准高效的储层改造技术。

## 4 结论与认识

(1) 红星地区斜坡—陆棚相带发育的富藻高碳页岩提供了较好的有机质富集基础,有机—无机作用协同扩大了较多的储集空间,构造变形弱区提供了较好的保存条件,针对性的工程改造方案保证了压裂效果,以上共同组成了川东红星地区二叠系茅口组一亚段页岩气的富集因素。

(2) 川东红星地区二叠系茅四段页岩以贫氧次生组分为主,有机质类型主要为Ⅱ<sub>1</sub>型,热演化程度适中,处于产烃的主要时期;茅口组四段一亚段“五高一薄一多”的页岩具有较大的勘探潜力;斜坡—陆棚相也是优质页岩发育的有利相带,打破了海相优质页岩以硅质页岩为主的固有认识。目前针对红星地区茅四段一亚段储层的研究已经较为成熟,但是针对整个中国南方二叠系这类新型储层的分布规律、展布特征以及有利区分布还有待进一步研究。

(3) 川东地区的页岩气勘探开发正向着“深层、薄层、常压、多类型、立体勘探开发”的方向前进。应该继续加大对对于新区新层系的勘探力度,使红星地区二叠系成为继涪陵地区志留系之后,华南地区下一步重要的增储上产阵地。

## 参考文献

- [1] 梁西文,李乐.鄂西渝东上二叠统吴家坪组页岩气地质条件及勘探潜力[J].石油实验地质,2021,43(3):386-394.  
Liang Xiwen, Li Le. Geological conditions and exploration potential of shale gas in the Upper Permian Wujiaping Formation, Yudong District, West China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021,43(3):386-394.
- [2] 胡德高,周林,包汉勇,等.川东红星地区HY1井二叠系页岩气勘探突破及意义[J].石油学报,2023,44(2):241-252.  
Hu Degao, Zhou Lin, Bao Hanyong, et al. Breakthrough and significance of Permian shale gas exploration of Well HY1 in Hongxing area, eastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023,44(2):241-252.
- [3] Stampfli G M, Borel G D. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002,196(1-2):17-33.
- [4] 杨帅,陈安清,张玺华,等.四川盆地二叠纪栖霞—茅口期古地理格局转换及勘探启示[J].沉积学报,2021,39(6):1466-1477.  
Yang Shuai, Chen Anqing, Zhang Xihua, et al. Paleogeographic transition and exploration implications of the Permian Qixia-Maokou Stage in the Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021,39(6):1466-1477.
- [5] 沈华,杨光,屈卫华,等.四川盆地自贡地区中二叠统茅口组多类型储层特征及分布预测[J].中国石油勘探,2023,28(3):49-63.  
Shen Hua, Yang Guang, Qu Weihua, et al. Characteristics and prediction of multi-type reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation in Zigong area, Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(3):49-63.
- [6] 何文渊,白雪峰,蒙启安,等.碳酸盐台内斜坡认识突破与重大发现:以川中地区中二叠统茅口组二段气藏勘探为例[J].中国石油勘探,2023,28(1):59-70.  
He Wenyuan, Bai Xuefeng, Meng Qi'an, et al. New understanding and significant discovery in the inner slope of carbonate platform: a case study of gas exploration in the second member of Maokou Formation in central Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(1):59-70.
- [7] Li Qian, Yang Shuai, Azmy Karem, et al. Strontium isotope evolution of Middle Permian seawater in the Sichuan Basin, South China: possible causes and implications[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2021,565:110188.
- [8] Ma Bingshan, Liang Han, Wu Guanghui, et al. Formation and evolution of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2):373-387.
- [9] 胡世忠.论东吴运动构造事件与二叠系分统界线问题[J].地层学杂志,1994,18(4):309-315.  
Hu Shizhong. On the tectonic event of the Dongwu movement and the Permian subdivision boundary[J]. Journal of Stratigraphy, 1994,18(4):309-315.
- [10] 马军,关琳琳,高全芳,等.渝东南地区背斜型浅层常压页岩气勘探发现[J].中国石油勘探,2022,27(3):47-60.  
Ma Jun, Guan Linlin, Gao Quanfang, et al. Exploration and discovery of normal pressure shale gas in shallow anticline in southeast Chongqing area[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(3):47-60.
- [11] 付永强,杨学锋,周朗,等.川南页岩气体积压裂技术发展与应用[J].石油科技论坛,2022,41(3):18-25.  
Fu Yongqiang, Yang Xuefeng, Zhou Lang, et al. Development and application of shale gas volume fracturing technology in southern Sichuan Basin[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2022,41(3):18-25.
- [12] 韩月卿,郝运轻,韩文彪,等.川东南地区中二叠统茅口组一段眼球状灰岩成因机理[J].油气地质与采收率,2022,29(6):12-21.  
Han Yueqing, Hao Yunqing, Han Wenbiao, et al. Genetic mechanism of eyeball-shaped limestone in first member of Middle Permian Maokou Formation in southeast Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022,29(6):12-21.
- [13] 王必金,包汉勇,刘皓天,等.川东红星地区吴家坪组富有机质页岩特征与发育控制因素[J].地质科技通报,2023,42(5):70-81.  
Wang Bijin, Bao Hanyong, Liu Haotian, et al. Characteristics and controlling factors of the organic-rich shale in the Wujiaping Formation of the Hongxing area, eastern Sichuan Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5):70-81.
- [14] 包汉勇,赵帅,梁榜,等.川东红星地区二叠系吴家坪组页岩气富集高产主控因素与勘探启示[J].中国石油勘探,2023,28(1):71-82.



- Bao Hanyong, Zhao Shuai, Liang Bang, *et al.* The main controlling factors and exploration insights of the Permian Wujiaping Formation shale gas enrichment and high production in Hongxing area, east Sichuan[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(1):71–82.
- [15] 邓莉, 闫全人, 宋博, 等. 中—晚二叠世上扬子地块(四川盆地)裂解的沉积响应[J]. 岩石学报, 2021,37(8):2465–2482.
- Deng Li, Yan Quanren, Song Bo, *et al.* Sedimentary response to rifting in the Middle and Late Permian Yangzi Massif (Sichuan Basin)[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021,37(8):2465–2482.
- [16] 陈卫东, 陈义才, 徐发波, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组地层划分、对比与岩溶古地貌恢复[J]. 天然气工业, 2021, 41(6):27–36.
- Chen Weidong, Chen Yicai, Xu Fabo, *et al.* Stratigraphic delineation, comparison and recovery of karst palaeomorphology of the Middle Permian Maokou Formation in the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021,41(6):27–36.
- [17] 文龙, 汪华, 徐亮, 等. 四川盆地西部中二叠统栖霞组天然气成藏特征及主控因素[J]. 中国石油勘探, 2021,26(6):68–81.
- Wen Long, Wang Hua, Xu Liang, *et al.* Characteristics and main controlling factors of natural gas formation in the Middle Permian Qixia Formation, western Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(6):68–81.
- [18] 张培先, 何希鹏, 高全芳, 等. 四川盆地东南缘二叠系茅口组一段页岩气藏地质特征及富集模式[J]. 石油与天然气地质, 2021,42(1):146–157.
- Zhang Peixian, He Xipeng, Gao Quanfang, *et al.* Geological characteristics and enrichment pattern of shale gas reservoirs in a section of Permian Maokou Formation in the southeast margin of Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021,42(1):146–157.
- [19] 胡东风, 王良军, 张汉荣, 等. 碳酸盐岩烃源岩气藏的发现及其油气地质意义:以四川盆地涪陵地区中二叠统茅口组一段气藏为例[J]. 天然气工业, 2020,40(7):23–33.
- Hu Dongfeng, Wang Liangjun, Zhang Hanrong, *et al.* Discovery of carbonate hydrocarbon reservoirs and their hydrocarbon geological significance: a case study of a section of Maokou Formation in the Middle Permian in Fuling area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020,40(7):23–33.
- [20] 张宇, 曹清古, 罗开平, 等. 四川盆地二叠系茅口组油气藏勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质, 2022,43(3):610–620.
- Zhang Yu, Cao Qinggu, Luo Kaiping, *et al.* Discovery and insights of oil and gas reservoirs in the Permian Maokou Formation, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022,43(3):610–620.
- [21] 陈波, 皮定成. 中上扬子地区志留系龙马溪组页岩气资源潜力评价[J]. 中国石油勘探, 2009,14(3):5–19.
- Chen Bo, Pi Dingcheng. Evaluation of shale gas resource potential of the Silurian Longmaxi Formation in the Middle and Upper Yangzi regions [J]. China Petroleum Exploration, 2009, 14(3):5–19.
- [22] 朱炎铭, 陈尚斌, 方俊华, 等. 四川地区志留系页岩气成藏的地质背景[J]. 煤炭学报, 2010,35(7):1160–1164.
- Zhu Yanming, Chen Shangbin, Fang Junhua, *et al.* Geological background of Silurian shale gas formation in Sichuan[J]. Journal of China Coal Society, 2010,35(7):1160–1164.
- [23] 黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 川南志留系龙马溪组页岩气形成条件与有利区分析[J]. 煤炭学报, 2012,37(5):782–787.
- Huang Jinliang, Zou Caineng, Li Jianzhong, *et al.* Analysis of shale gas formation conditions and favourable zones in the Silurian Longmaxi Formation, South Sichuan[J]. Journal of China Coal Society, 2012,37(5):782–787.
- [24] 贺训云, 蔡春芳, 姚根顺, 等. 黔南坳陷油苗来源:碳、硫同位素及生物标志物证据[J]. 岩石学报, 2013,29(3):1059–1072.
- He Xunyun, Cai Chunfang, Yao Genshun, *et al.* Origin of oil seedlings in the Qiannan Depression: carbon, sulphur isotope and biomarker evidence[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013,29(3):1059–1072.
- [25] 王绪龙, 赵孟军, 向宝力, 等. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系烃源岩[J]. 石油勘探与开发, 2010,37(5):523–530.
- Wang Xulong, Zhao Mengjun, Xiang Baoli, *et al.* Carboniferous hydrocarbon source rocks in the Ludong–Wucuiwan area, Junggar Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010,37(5):523–530.
- [26] 蔡勋育, 朱扬明, 黄仁春. 普光气田沥青地球化学特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2006,27(3):340–347.
- Cai Xunyu, Zhu Yangming, Huang Renchun. Geochemical characteristics and genesis of bitumen in the Puguang gas field[J]. Oil & Gas Geology, 2006,27(3):340–347.
- [27] 肖继林, 魏祥峰, 李海军. 涪陵海相页岩气和元坝—兴隆场湖相页岩气富集条件差异性分析[J]. 天然气勘探与开发, 2018,41(4):8–17.
- Xiao Jilin, Wei Xiangfeng, Li Haijun. Differential analysis of the enrichment conditions of Fuling sea-phase shale gas and Yuanba–Xinglong field lake-phase shale gas[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018,41(4):8–17.
- [28] 胡东风, 张汉荣, 倪楷, 等. 四川盆地东南缘海相页岩气保存条件及其主控因素[J]. 天然气工业, 2014,34(6):17–23.
- Hu Dongfeng, Zhang Hanrong, Ni Kai, *et al.* Preservation conditions of marine shale gas and its main controlling factors in the southeastern margin of Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014,34(6):17–23.
- [29] 赵文智, 贾爱林, 位云生, 等. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J]. 中国石油勘探, 2020,25(1):31–44.
- Zhao Wenzhi, Jia Ailin, Wei Yunsheng, *et al.* Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):31–44.
- [30] 郭旭升. 南方海相页岩气“二元富集”规律:四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探实践认识[J]. 地质学报, 2014,88(7):1209–1218.
- Guo Xusheng. Rules of two-factor enrichment for marine shale gas in southern China—understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014,88(7):1209–1218.
- [31] 包汉勇, 梁榜, 郑爱维, 等. 地质工程一体化在涪陵页岩气示范区立体勘探开发中的应用[J]. 中国石油勘探, 2022,27(1):88–98.
- Bao Hanyong, Liang Bang, Zheng Aiwei, *et al.* Application of geology and engineering integration in stereoscopic exploration and development of Fuling shale gas demonstration area[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(1):88–98.
- [32] 孙焕泉, 周德华, 赵培荣, 等. 中国石化地质工程一体化发展方向[J]. 油气藏评价与开发, 2021,11(3):269–280.
- Sun Huanquan, Zhou Dehua, Zhao Peirong, *et al.* Geology–engineering integration development direction of Sinopec[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021,11(3):269–280.