

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

张培先,何希鹏,高全芳,高玉巧,孙斌,蔡潇,何贵松,张志萍,刘娜娜

(中国石油化工股份有限公司华东油气分公司勘探开发研究院,江苏南京210019)

摘要:四川盆地东南缘(川东南)二叠系茅口组一段(茅一段)认识程度较低,以野外露头 and 钻井岩心等为基础,利用矿物岩石学、地球化学、普通薄片和氩离子抛光扫描电镜等实验分析资料,结合测井和地震属性预测技术,开展沉积相、烃源岩、储层物性及储集类型等研究,明确了茅一段页岩气地质特征及成藏富集模式。主要得到3点认识:①茅一段处于碳酸盐岩台地较深水外缓坡相,主要发育深灰色-灰黑色炭质泥岩、灰质泥岩、泥质灰岩和生屑灰岩4种岩性,炭质泥岩和灰质泥岩具有较高 $TOC(0.5\% \sim 5.1\%)$,适中的热演化程度($R_o 2.0\% \sim 2.3\%$),具备良好的烃源基础,为新类型非典型性页岩气;②茅一段发育有机质孔、溶蚀孔、粒缘缝和收缩缝等储集空间类型,形成“孔-缝-网”储集复合体,其中炭质泥岩和灰质泥岩主要发育有机质孔、粘土矿物收缩缝和层理缝,泥质灰岩和生屑灰岩主要发育溶蚀孔、粒缘缝、收缩缝和高角度缝;③茅一段页岩气具有“源储一体、连片分布、构造-裂缝双重控藏”的成藏富集模式,研究区茅一段连续分布面积超过 $7\,000\text{ km}^2$,地质资源量超 $5\,000 \times 10^8\text{ m}^3$,页岩气资源潜力大。研究成果对提高川东南地区新类型页岩气地质认识,指导页岩气勘探具有重要意义。

关键词:地质特征;富集模式;资源潜力;茅一段;二叠系;页岩气;川东南

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Geological characteristics and enrichment pattern of Permian Mao 1 Member shale gas reservoirs at the southeastern margin of Sichuan Basin

Zhang Peixian, He Xipeng, Gao Quanfang, Gao Yuqiao, Sun Bin, Cai Xiao, He Guisong, Zhang Zhiping, Liu Nana

(Exploration and Production Research Institute of East China Oil & Gas Company, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: To understand the shale gas reservoirs in the first member of the Permian Maokou Formation (Mao 1 Member) in the southeastern margin of Sichuan Basin (southeastern Sichuan Basin), we combined outcrop and core observation, mineralogical and geochemical data, thin section analysis and scanning electron microscopic results of argon ion beam cross sections, with logging and seismic attribute prediction techniques to study their sedimentary facies, source rocks, reservoir properties and types. The geological characteristics and gas enrichment pattern of the Mao 1 Member shale were revealed and summarized as: (1) The member is located in the relatively deep-water gentle slope of a carbonate platform and comprised of well-developed dark gray-gray black carbonaceous mudstone, calcareous mudstone, argillaceous limestone and bioclastic limestone. The carbonaceous and calcareous mudstone, among others, with relatively high $TOC(0.5\% - 5.1\%)$ and moderate thermal maturity ($R_o: 2.0 - 2.3$), are potential hydrocarbon source rocks with possible new-type atypical shale gas. (2) The reservoir space in the member including organic matter pores, dissolution pores, grain boundary fractures, and constricted fissures, may form a reservoir complex of “pore-fracture-network”. The carbonaceous mudstone and calcareous mudstone are dominated by organic matter pores, clay mineral shrinkage cracks and bedding-parallel fractures, while argillaceous limestone and bioclastic limestone mainly develop dissolution pores, grain boundary fractures, contraction fissures and high-angle cracks. (3) The shale gas enrichment in the member can be generally described as “integrated continuous source-reservoir assemblages controlled dually by structures and fractures”, and results in an estimated geological resource volume of more than 500 BCM continuously distributed in an

收稿日期:2020-06-16;修订日期:2020-11-30。

第一作者简介:张培先(1983—),男,硕士、副研究员,页岩气勘探。E-mail:zhangpx.hdsj@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05061);中国石化科技部项目(P20059-6, P19017-3)。

area of more than 7 000 km². It therefore has great exploration potential for shale gas. The research results are of great significance to improving the understanding of the new-type shale gas geology and guiding the shale gas exploration in southeastern Sichuan Basin.

Key words: geological characteristics, enrichment pattern, resource potential, Mao 1 Member, the Permian, shale gas, Southeast Sichuan Basin

四川盆地二叠系茅口组的常规天然气勘探始于20世纪50年代,至今已有70年的勘探开发历程^[1-4],主要以茅二段-茅三段的滩相储层和风化壳古岩溶型储层等为目的层系,发现了一批中等规模天然气田。截止目前共发现300多个岩溶缝洞型气藏,累计探明储量 $852 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[4]。近年来,在川东北元坝等地区茅三段实现重大突破,YB7井试获百万方商业气流^[5]。从盆地范围来看,川北、川南和川西等地区茅二段-茅三段属于碳酸盐岩台地内缓坡沉积环境,以白云岩沉积为主,后期发生不同程度溶蚀,储层溶蚀孔洞发育^[6-10]。而川东南地区处于较深水的碳酸盐岩外缓坡沉积环境,水体相对较深,茅二段-茅三段主要沉积生屑灰岩和泥晶灰岩等,岩溶白云岩储层不发育,一直未实现突破。但近年来,在以志留系为目的层系的钻探过程中,多口井在茅一段中发现较好的气测显示,甚至发生溢流,节流点火火焰高达5~20 m,展现出较好的含气性,茅一段是否具备非常规页岩气勘探潜力,急需开展攻关研究。

本文从非常规页岩气角度出发,按照“源储一体”评价思路,利用老井复查、岩心观察与描述、成像测井评价以及地震属性预测技术,从沉积、烃源、储层和富集模式等方面开展茅一段页岩气藏地质特征研究。研究认为茅一段处于较深水缓坡相,地化指标较好,孔-缝-网发育,含气性好,具备页岩气成藏的地质条件^[11-14],为非典型性新类型页岩气。结合茅一段构造与保存条件,建立了成藏富集模式,明确了川东南南川地区为有利区带,实现了新类型页岩气勘探突破,扩大了页岩气资源规模,有效指导勘探实践。研究成果对提高川东南地区非典型性页岩气的地质认识具有一定的理论意义,对指导四川盆地东南缘新类型页岩气勘探具有重要的实践意义。

1 地层特征

四川盆地茅口组厚度一般为180~320 m^[3,15-19],川东南地区厚240~300 m,根据电性特征,茅口组自下而上可划分为茅一段、茅二段、茅三段和茅四段(图1),全区可追踪对比。茅一段厚150~180 m,整体分

布较为稳定,主要发育炭质泥岩、灰质泥岩、泥质灰岩和生屑灰岩,泥质含量高,电性上表现为高伽马、中低电阻特征。茅二段-茅三段厚80~100 m,以生屑灰岩为主,具有低伽马和高电阻特征。茅四段受东吴运动影响,遭受不同程度剥蚀,东厚西薄,彭水地区厚32~40 m,南川地区厚7~15 m,以泥质灰岩为主。川东南地区茅口组各段岩性和电性具有较好的可比性。

根据岩性和电性特征,川东南地区茅一段可进一步划分为上、下2个亚段(图1)。茅一下亚段厚90~110 m,主要发育灰黑色炭质泥岩、深灰色灰质泥岩和泥质灰岩,电性特征表现为相对高伽马(35~97 API)、低电阻($14 \sim 1\,000 \, \Omega \cdot \text{m}$);茅一上亚段厚50~65 m,主要发育灰色、深灰色泥质灰岩和生屑灰岩,夹灰质白云岩具层状和块状构造,电性特征表现为相对高伽马(36~122 API)和中高电阻($910 \sim 20\,000 \, \Omega \cdot \text{m}$)。

2 沉积相与岩性特征

2.1 沉积特征

四川盆地及周缘二叠系茅口组沉积时期继承了栖霞组台地相沉积环境^[7-8,15],主要经历了先快速海侵后缓慢海退的沉积过程,整体为碳酸盐岩缓坡沉积环境,具有南西高和北东低的特点。由南西向北东,沉积相依次为内缓坡、中缓坡、外缓坡以及斜坡-盆地相^[15-17]。内缓坡发育高能滩和低能滩间沉积,中缓坡发育水体相对较浅的近端沉积,外缓坡发育水体相对较深的深台洼沉积。川东南地区处于较深水的碳酸盐岩外缓坡相(图2),茅口组可划分为一个完整的三级旋回^[18-20],茅一段为海侵体系域,沉积形成了灰黑色炭质泥岩、深灰色灰质泥岩、泥质灰岩和浅灰色生屑灰岩等4种主要岩性组合,茅二段-茅四段为海退体系域,以生屑灰岩和灰岩为主(图1)。

茅一段处于较深水的外缓坡相,主要为灰黑色炭质泥岩、深灰色灰质泥岩、泥质灰岩和浅灰色生屑灰岩,泥质含量相对较高,具高伽马和相对低电阻的电性特征。茅二段-茅四段水体变浅,逐渐相变为中缓坡和内缓坡沉积,主要沉积浅灰色块状生屑灰岩和灰岩,具低伽马和高电阻的电性特征(图1,图2)。

生屑灰岩/灰岩呈浅灰色—深灰色,岩心表面可观察到大量的生物化石,定向排列(图 3d₁—d₃)。

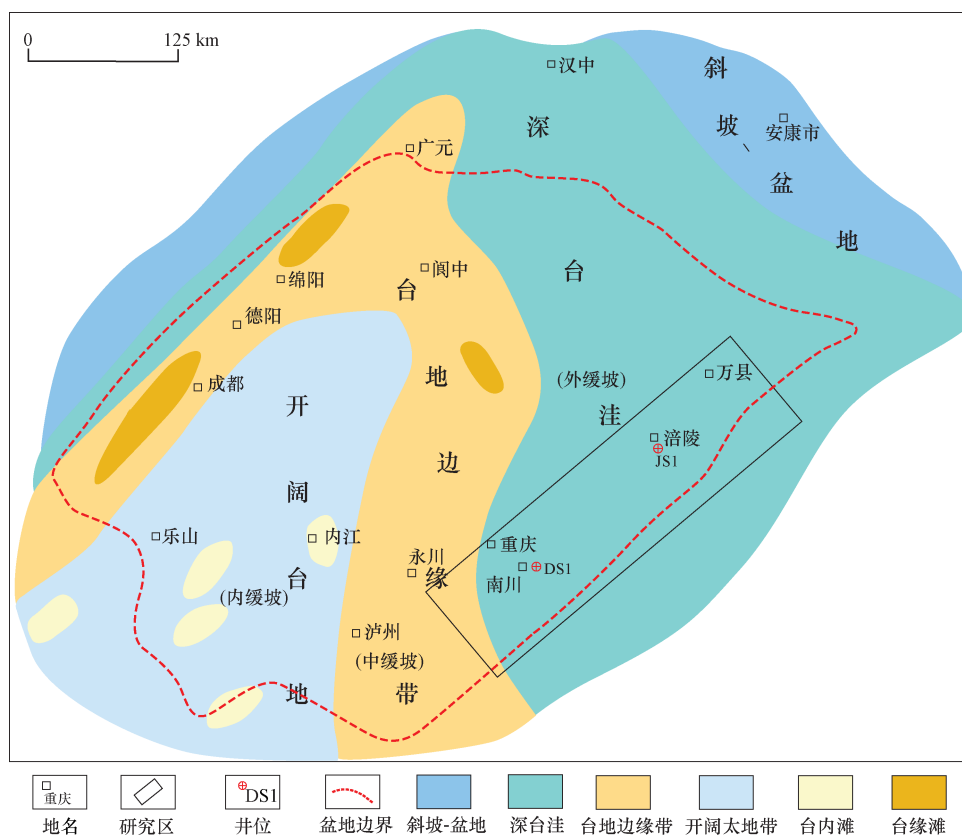


图2 四川盆地及周缘二叠系茅口组沉积相

Fig. 2 Sedimentary facies of the Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and its periphery

3 源-储特征

3.1 地化特征

有机碳含量 (TOC) 和热演化程度 (R_o) 是页岩气静态评价指标中的 2 个重要指标, 决定了页岩品质和生气所处的阶段, 影响着有机质孔、孔隙度、含气量及单井产量, 是页岩气形成与富集的基础。实验分析及勘探实践表明, 有机质孔、孔隙度、含气量及单井产量与 TOC 呈正相关; 热演化程度的高低决定了页岩生烃量的多少, 对页岩孔径大小、有机质孔发育程度及形状、含气量高低具有重要影响。

不同沉积相带控制了页岩发育层位及横向变化,同时也决定了页岩有机质丰度的高低。川东南地区 DS1 井茅一段 74 个岩心样品 *TOC* 实验分析表明(图 1),茅一段 *TOC* 为 0.5%~2.7%,最高 5.1%,平均 1.1%,超过烃源岩下限标准,为较好烃源岩。茅一段自上而下 *TOC* 呈逐渐增大趋势,与志留系龙马溪组具有相类似的纵向变化规律,茅一上亚段 *TOC* 平均 0.9%,茅一下亚段 *TOC* 平均 1.5%。平面上自西向东 *TOC* 呈增大的趋势,涪陵地区 *TOC* 平均 0.6%~

1.0%,南川地区 *TOC* 平均 0.8%~1.5%,綦江地区 *TOC* 平均 0.5%~0.8%。 R_o 为 2.00%~2.30%,平均 2.16%,处于高热演化阶段,略低于寒武系和志留系页岩的热演化程度^[21-25],处于适中的生气窗范围内,具备较好的生气条件,有利于大量生气及有机质孔的演化与保存,茅一段生烃强度较大,为 $(40 \sim 50) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[22]。

茅一段不同岩性的 *TOC* 差异较大,DS1 井实验结果表明炭质泥岩和灰质泥岩 *TOC* 较高,平均分别为 2.5% 和 1.1%,为好、较好烃源岩;泥质灰岩和生屑灰岩 *TOC* 相对较低,分别平均为 0.8% 和 0.6%,为差烃源岩,低于寒武系和志留系页岩 *TOC*,但仍具备生烃条件(图 5)。

3.2 储层特征

1) 物性特征

茅一段岩性较致密,主要为低孔、低渗储层,DS1井茅一段测井孔隙度2.3%~3.2%,渗透率 $(0.05 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,实验分析孔隙度1.00%~4.00%,平均1.76%(图1)。纵向上孔隙度具有自上而下逐渐升高的趋势,茅一上亚段测井孔隙度平均2.40%,茅一下亚段测井孔隙度平均3.20%(图1)。平面上孔隙

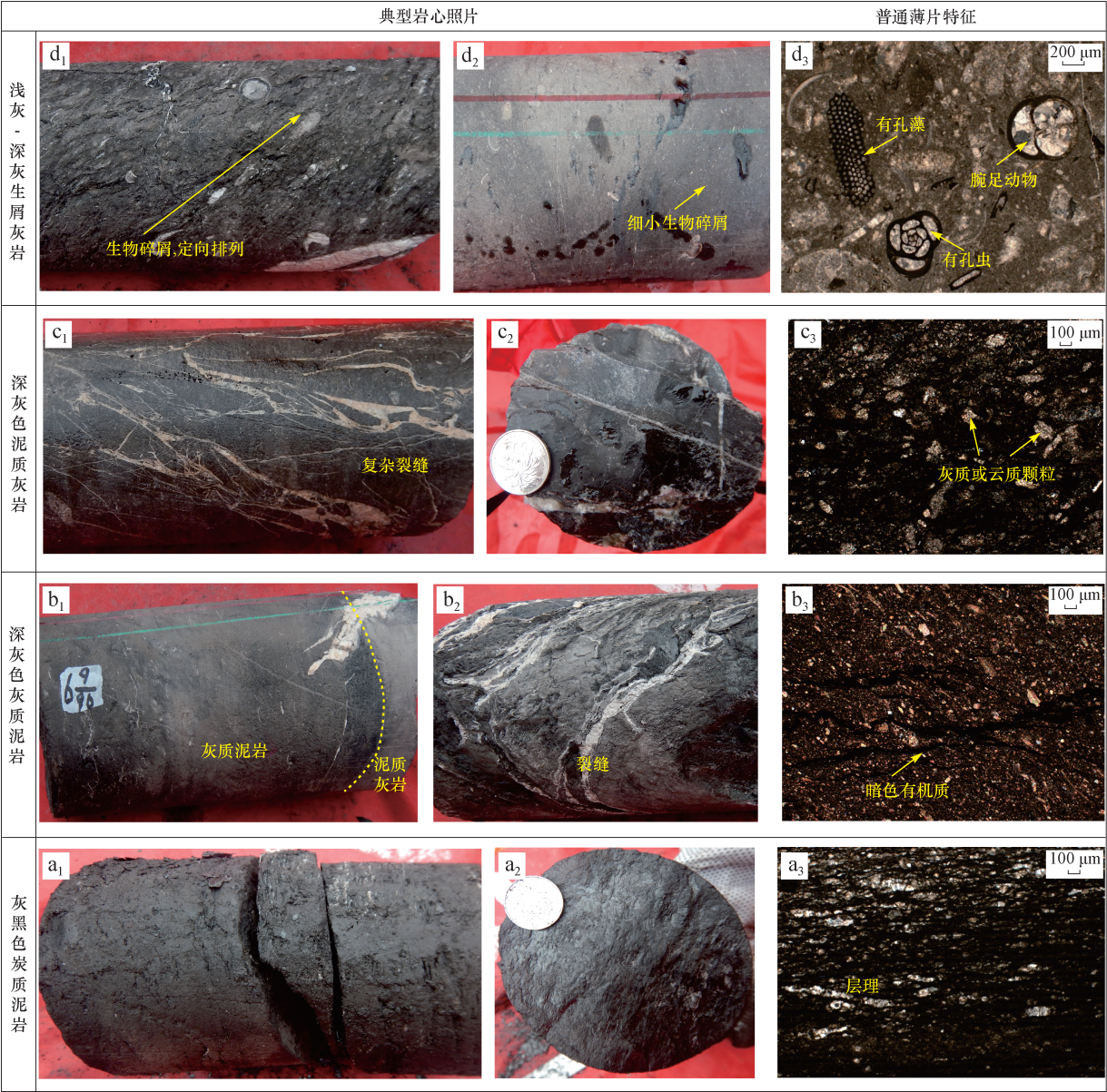


图 3 川东南地区二叠系茅口组不同岩性与储层特征

Fig. 3 Lithology and reservoir characteristics of the Permian Maokou Formation, southeastern Sichuan Basin

a₁. 炭质泥岩, DS1 井, 埋深 1 219 m; a₂. 炭质镜面; a₃. 普通薄片下见层理; b₁. 灰质泥岩, DS1 井, 埋深 1 208 m; b₂. 灰质泥岩中的裂缝被方解石充填; b₃. 暗色有机质充填裂缝; c₁. 泥质灰岩发育复杂裂缝, DS1 井, 埋深 1 156 m; c₂. 泥质灰岩岩心断面; c₃. 碳酸盐岩颗粒; d₁. 深灰色生屑灰岩, DS1 井, 埋深 1 092 m; d₂. 灰色生屑灰岩, DS1 井, 埋深 1 085 m; d₃. 薄片下见大量生物化石

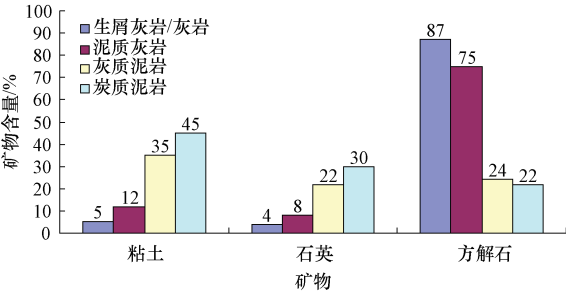


图 4 川东南地区二叠系茅一段不同岩性主要矿物组分含量对比
Fig. 4 Comparison of main mineral components in different lithologies of the Permian Mao 1 Member in southeastern Sichuan Basin

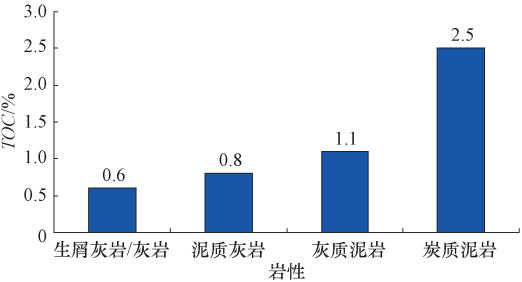


图 5 川东南地区二叠系茅一段不同岩性 TOC 含量对比
Fig. 5 Comparison of TOC values in different lithologies of the Permian Mao 1 Member, southeastern Sichuan Basin

度具有由北东向西南逐渐增大的趋势,涪陵地区孔隙度平均 2.00%~2.30%,南川地区孔隙度平均 2.30%~3.00%,綦江地区孔隙度平均 2.00%~2.50%。茅一段 4 种岩性的孔隙度存有一定差异(图 6),炭质泥岩孔隙度相对较高,平均可达到 2.00%以上,有机质孔发育对基质孔隙度有积极贡献;生屑灰岩的孔隙度平均 1.37%,略高于泥质灰岩(1.36%)、灰质泥岩(1.20%),无机孔(溶蚀孔)起到了主要作用。

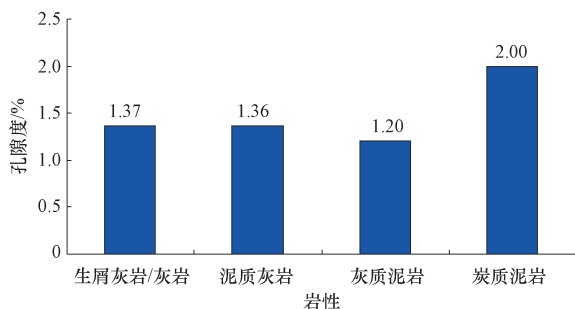


图 6 川东南地区二叠系茅一段不同岩性平均孔隙度对比

Fig. 6 Comparison of average porosity values in different lithologies of the Permian Mao 1 Member, southeastern Sichuan Basin

2) 储集空间类型

页岩气储集空间类型多样,众多学者从不同角度对志留系和寒武系等认识程度较高的页岩开展了精细分类,根据前人认识,通过岩心描述、FMI 成像测井分析、薄片观察与氩离子抛光扫描电镜等不同研究尺度,茅一段可分为有机质孔、无机孔和微裂缝 3 类。

通过氩离子抛光扫描电镜分析,茅一段有机质孔可分为独立的有机质孔隙、包裹粘土矿物的有机质孔隙和黄铁矿晶间有机质孔隙 3 个亚类(图 7),孔径在 10 nm~5 μm 不等,圆度较好。由于有机质丰度偏低,茅一段有机质孔较志留系龙马溪组和寒武系牛蹄塘组有机质孔^[24]发育少,但孔径较大,可能跟生烃及成岩有关。有机质孔发育是页岩气富集高产的重要因素,有机质热演化、压实作用和地层压力是影响有机质孔隙演化及孔径变化的关键因素。有机碳含量宏观控制有机质孔发育,有机碳含量越高,有机质孔越发育,储层基质孔隙度越高。有机质孔的发育有利于页岩气的吸附,对后期较长时间稳产具有积极意义。

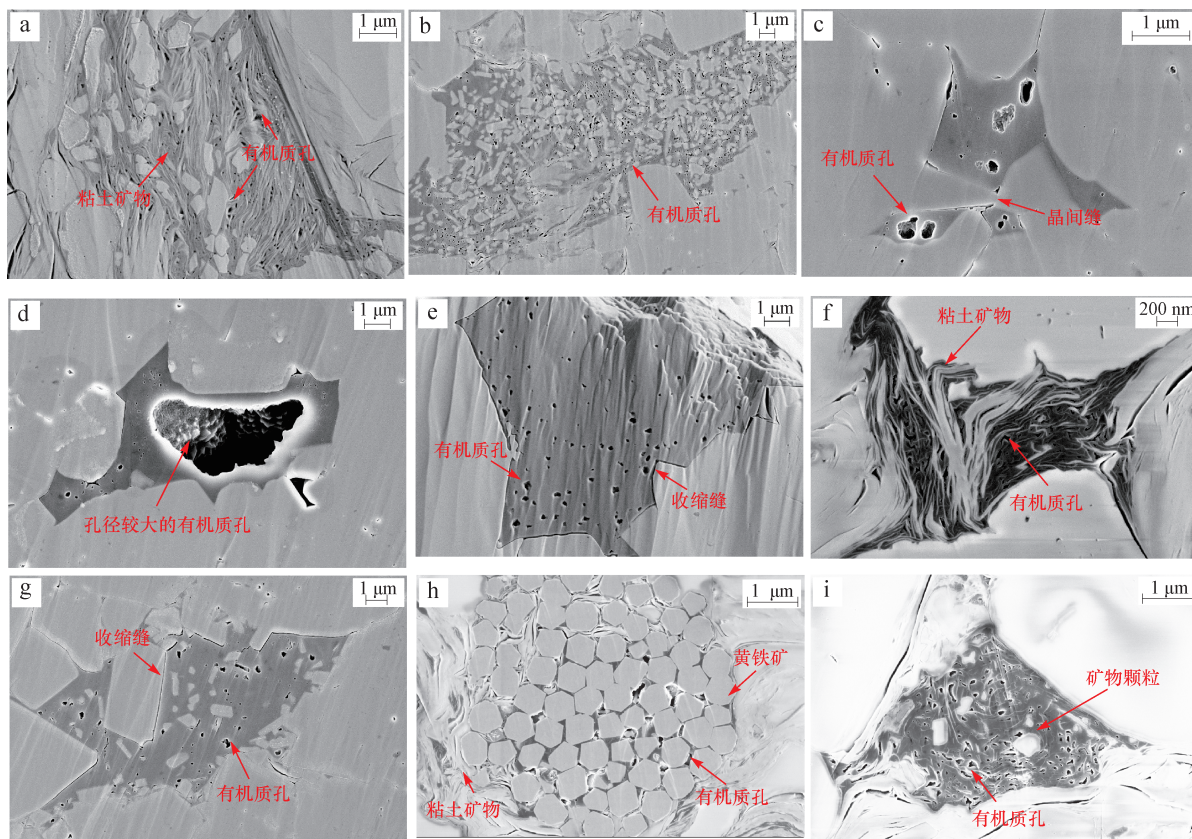


图 7 川东南地区二叠系茅一段有机质孔显微照片图版

Fig. 7 Organic matter pore plot of the Permian Mao 1 Member, southeastern Sichuan Basin

- a. 包裹粘土矿物的有机质孔,DS1 井,埋深 1 160 m;b. 矿物晶间有机质孔,DS1 井,埋深 1 162.1 m;c. 有机质孔与晶间缝,DS1 井,埋深 1 177.2 m;d. 独立的有机质孔,DS1 井,埋深 1 181.2 m;e. 独立的有机质孔,DS1 井,埋深 1 185.4 m;f. 包裹粘土矿物的有机质孔,DS1 井,埋深 1 207.3 m;g. 有机质孔与收缩缝,DS1 井,埋深 1 204.5 m;h. 黄铁矿晶间有机质孔,DS1 井,埋深 1 235.4 m;i. 独立的有机质孔,DS1 井,埋深 1 235.6 m

无机孔主要为溶蚀孔,其次为粘土矿物晶间孔,少量黄铁矿晶间孔,从大量扫描电镜图像中可以看到,溶蚀孔大多发育于方解石和白云石之中,溶蚀孔数量多,孔径大,形状以较为规则的多边形为主。微裂缝具多期性,跟构造运动有关,被方解石或有机质充填,以粒缘缝为主,局部可见滑石和粘土矿物收缩缝(图8)。整体上来看,无机孔中的溶蚀孔和微裂缝中的粒缘缝是储集空间中最主要的2种储集空间类型,在茅一段广泛发育。有机质孔和溶蚀孔是储集空间的主要贡献者,粒缘缝则除了提供储集空间外,更主要是储层流体渗流扩散的重要通道。

岩心观察与FMI成像测井分析表明,茅一段发育水平缝、层理缝和高角度缝等宏观裂缝,局部发育小型揉皱,方解石充填或半充填,缝宽0.1~5.0 cm,裂缝密度1.7条/m,DS1井识别出53条水平缝和35条高

角度裂缝。

根据有机质孔、无机孔和微裂缝3种主要储集空间类型的分布与关系,构建了孔-缝-网复杂体,形成了茅一段“源-储一体”的页岩气储集模式。生屑灰岩、泥质灰岩储层中,大量微米级溶蚀孔和粒间孔构成了页岩气运移的孔隙网络,炭质泥岩、灰质泥岩储层中丰富的有机质含量及其表面大量发育的有机质孔,通过层理缝或大量发育的粒缘缝连接,形成了相对于纯泥页岩储层有着更好渗流能力的孔-缝-网复杂体(图9)。

茅一段发育4种岩性地层,每种岩性的储集类型有所差异。炭质泥岩和灰质泥岩以有机质孔、溶蚀孔和粒缘缝为主,粘土矿物晶间孔比例增加,是所有岩性中粘土矿物晶间孔最发育的岩石类型,局部黄铁矿富集。泥质灰岩、生屑灰岩以溶蚀孔和粒缘缝为主,其次为有机质孔,极少的粘土矿物晶间孔。

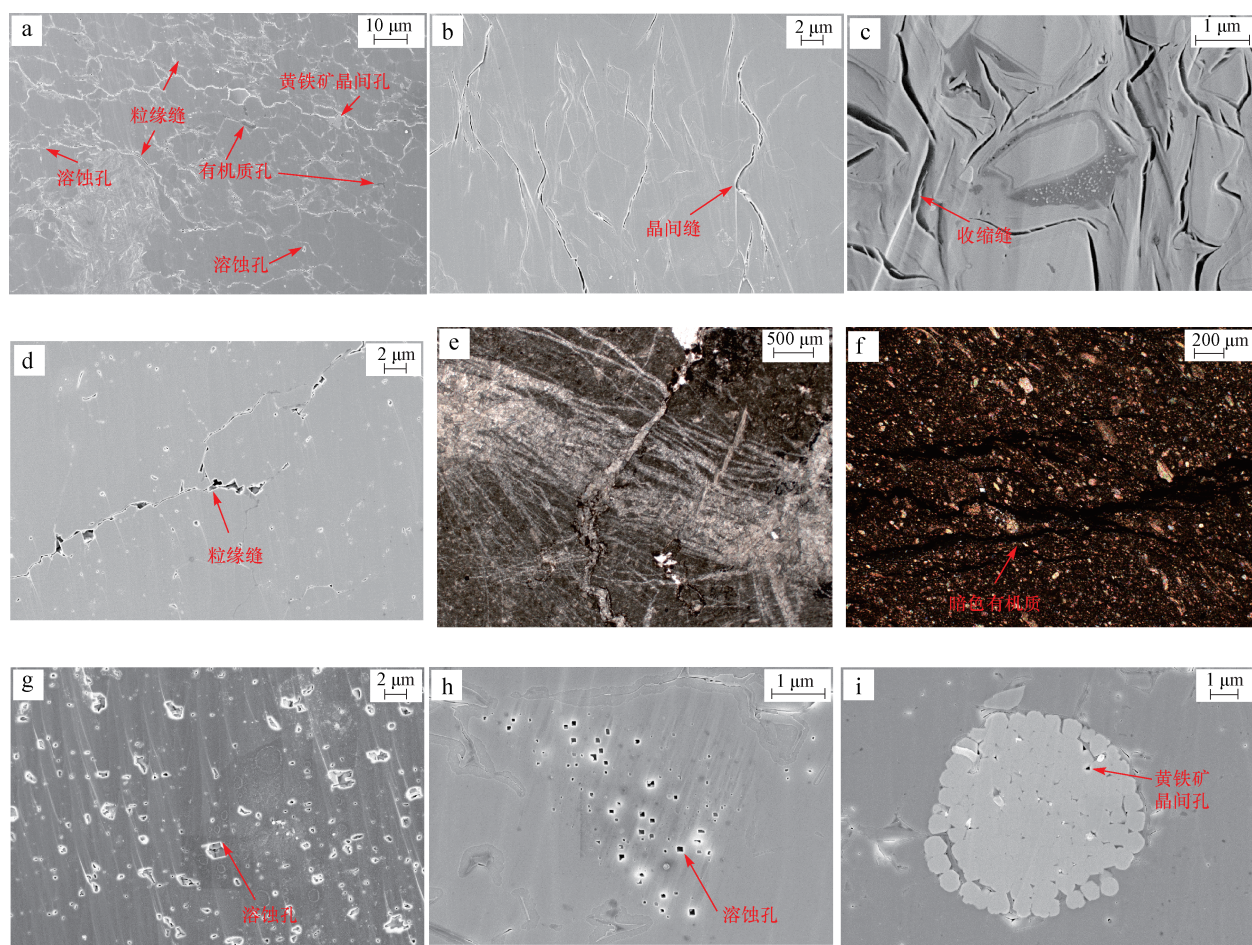


图8 川东南地区二叠系茅一段微裂缝与无机孔显微照片图版

Fig. 8 Micrographs showing the micro-cracks and pores in the Permian Mao 1 Member, southeastern Sichuan Basin

a. 孔-缝-网复合体, DS1井, 埋深1 232.6 m; b. 粘土矿物晶间缝, DS1井, 埋深1 165.6 m; c. 滑石收缩缝, DS1井, 埋深1 188.4 m; d. 粒缘缝, DS1井, 埋深1 179.8 m; e. 多期微裂缝, DS1井, 埋深1 185.2 m; f. 微裂缝被有机质充填, DS1井, 埋深1 207.3 m; g. 溶蚀孔, DS1井, 埋深1 203.5 m; h. 溶蚀孔, DS1井, 埋深1 234.6 m; i. 黄铁矿晶间孔, DS1井, 埋深1 235.6 m

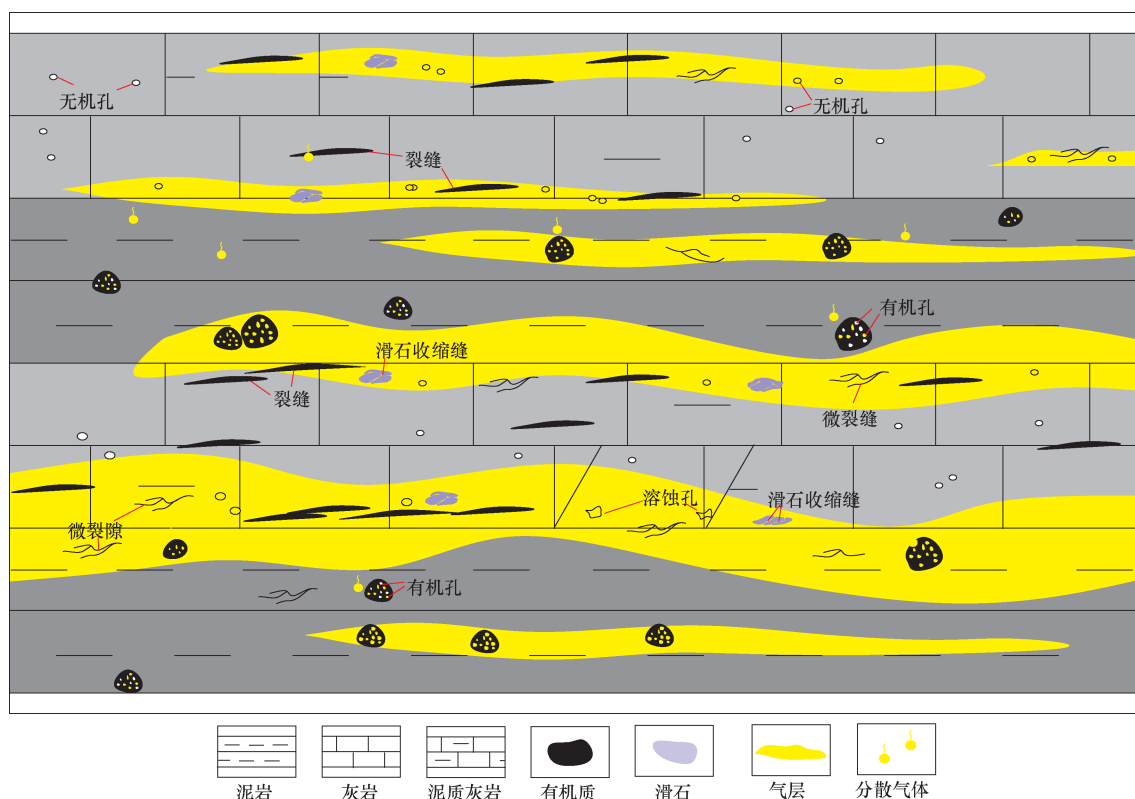


图9 川东南地区二叠系茅一段“源-储一体”页岩气储集模式

Fig.9 Shale gas source-reservoir pattern of the Permian Mao 1 Member, southeastern Sichuan Basin

4 含气性及气体组分

川东南地区多口钻井揭示茅口组气测显示主要集中在茅一段下部,主要是由于茅一段下部微裂缝和有机质孔相对发育。平面上具有明显分区性,涪陵等构造相对稳定地区,茅一段储层以基质孔隙为主,裂缝发育相对较少,气测全烃一般为2%~5%,南川等地区处于构造复杂区,裂缝较发育,气测全烃一般20%~70%,揭示了茅一段含气性较好。实验分析表明,泥质灰岩和生屑灰岩实测含气量(0.20~1.14) m^3/t ,主要是因为裂缝较发育,以游离气为主,取心过程中逸散较快,导致实验结果偏低,灰质泥岩和炭质泥岩实测含气量(1.00~2.17) m^3/t ,主要是由于泥岩有机质孔较发育,吸附气占有较大比例,逸散较慢。利用三维地震属性开展的频率衰减梯度表明,茅一段含气层具有全区连续性分布的特点,保存条件较好的背斜区气测显示为饱满型,靠近出露区的斜坡区或向斜区气测显示表现为低幅型,含气丰度逐渐降低。DS1井测井解释茅一下亚段含气量高,含气性更好,含气饱和度大于70%,优选1200~1236 m进行中途测试,试获 $5.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流,展现出良好的储层含气性。

茅一段天然气同位素实验分析结果表明,气体碳同位素具有部分倒转的特征^[26-29], $\delta^{13}\text{C}_2$ (-24.5‰) > $\delta^{13}\text{C}_3$ (-25.2‰) > $\delta^{13}\text{C}_1$ (-31.3‰)。茅口组(DS1井)各组分碳同位素符合油型裂解气的特征,与志留系龙马组(PY1井, PY5井)相似(图10a)。气体组分含量与川东北的茅口组(储层为茅二段和茅三段)差异较大,甲烷平均含量96.5%,乙烷平均含量0.7%,丙烷平均含量0.07%,含少量氮气和氦气,不含硫化氢,为干气气藏。将二叠系茅口组(DS1井)、志留系龙马溪组(PY5井)和三叠系飞仙关组(SY12-2井)气体碳同位素分布特征进行对比(图10b),三者的碳同位素分布特征具有一定差异性,龙马溪组页岩气气体碳同位素完全倒转($\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3$),飞仙关组天然气气体碳同位素部分倒转($\delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3 > \delta^{13}\text{C}_1$),但分布型式与茅口组相近,不同层位气体组分碳同位素值相差较大(10%左右),表明气源存有差异。

5 页岩气成藏富集模式及勘探潜力

5.1 页岩气成藏富集模式

川东南地区经历了加里东、海西、印支、燕山和喜

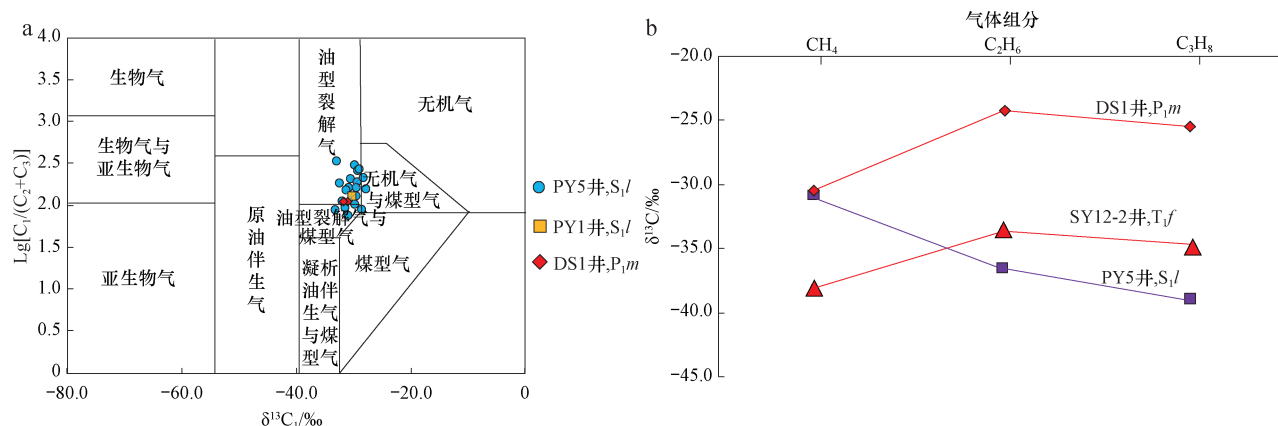


图10 川东南地区飞仙关组、茅口组和龙马溪组气体碳同位素对比

Fig. 10 Correlation of carbon isotopes of gas samples from the Feixianguan, Maokou and Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin

a. 气体碳同位素图版; b. 气体组分碳同位素倒转关系对比

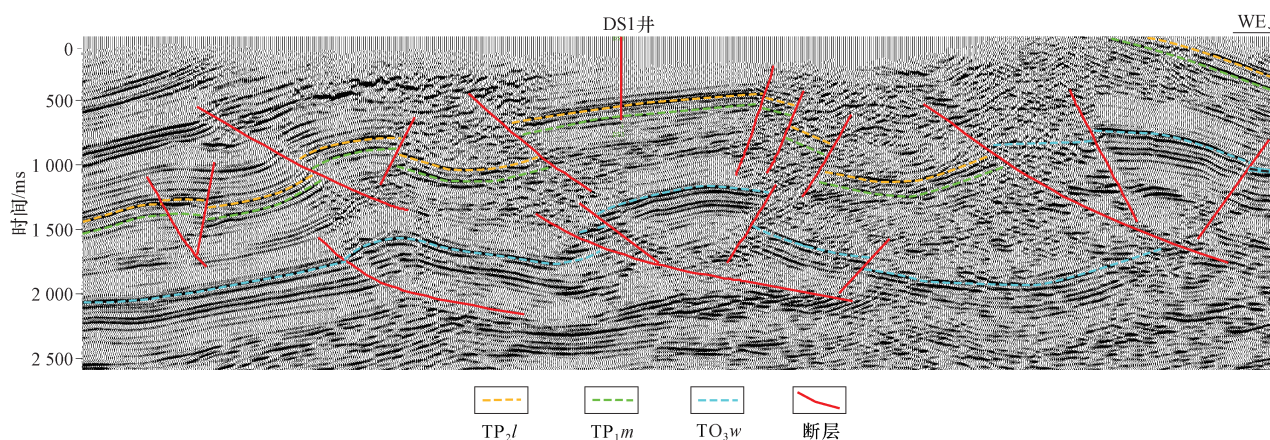


图11 川东南南川地区过DS1井地震剖面

Fig. 11 Seismic profile crossing Well DS1 in Nanchuan, southeastern Sichuan Basin

马拉雅等多期构造运动,构造变形较强烈,主要受燕山期雪峰山逆冲推覆作用和喜马拉雅期抬升剥蚀作用影响,形成了东西分带、隆凹相间的构造格局。自东向西递进变形,改造强度东强西弱,抬升幅度东高西低,保存条件逐步变好。川东南地区齐岳山断裂以西属于盆缘过渡区,保存条件较好,齐岳山断裂以东属于盆外褶皱区,保存条件较差。川东南地区二叠系茅一段构造特征与志留系具有一定继承性和相似性(图11),断层以挤压为主,侧向封闭性较好,茅二段致密灰岩-龙潭组泥岩、栖霞组致密块状灰岩和韩家店组泥岩,物性较差,为茅一段提供良好的顶、底板条件和盖层条件,纵向封闭性好,是富集的重要条件。川东南茅一段地层压力系数为1.14~1.20,背斜区构造高部位保存条件好,茅一段含气层数量多、厚度大,由北向南,随着保存条件逐渐变差,气测显示由饱满型逐渐过渡为指峰型和低幅型,越靠近出露区,地层压力系数越低,茅一段显示越差,页岩气富集程度越低。

基于茅一段地化特征、源储特征和气体同位素特征,结合研究区构造与裂缝特征、单井测试产量和保存条件等综合分析,形成了茅一段“源储一体、连片分布以及构造-裂缝双重控藏”的非典型性页岩气成藏富集模式(图12)。

川东南地区外缓坡相茅一段炭质泥岩、灰质泥岩烃源岩提供良好的物质基础(TOC 高, R_o 适中),粘土矿物和滑石等收缩缝,粒缘缝,溶蚀孔、晶间孔等无机孔与有机质孔等形成优质储层,“源储一体”配置关系良好。

川东南地区外缓坡相炭质泥岩、泥质灰岩大面积分布^[3]并含气,构造与裂缝有利于游离气富集,是控制高产的关键因素。裂缝为源内短距离运移提供良好的通道,孔-缝-网复合体的组合为页岩气聚集和富集提供了良好储集空间,裂缝发育程度是控制茅一段高产的关键因素,具有与志留系页岩气相似的高产规律^[30-34]。以南川地区平桥背斜为例,位于平桥背斜高

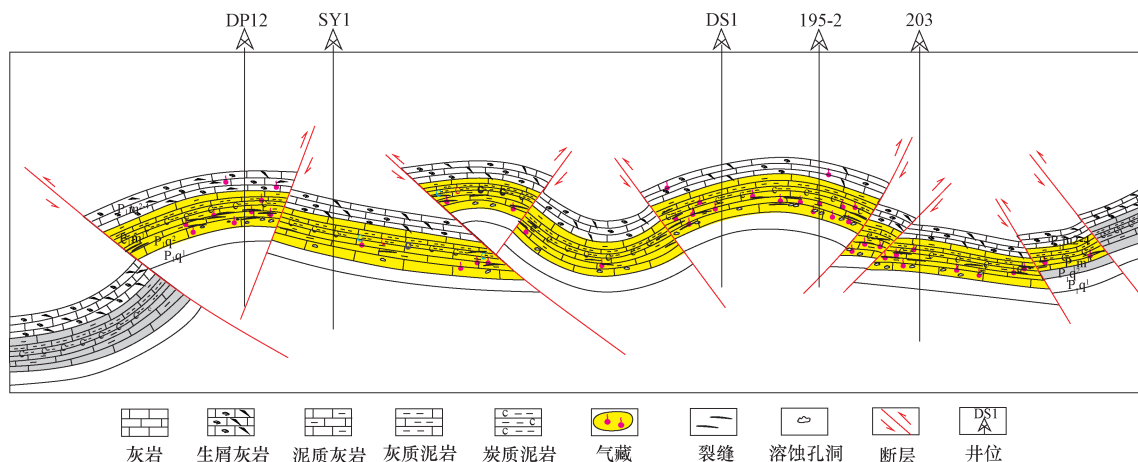


图12 川东南地区二叠系茅一段气藏剖面示意图

Fig. 12 Schematic diagram showing the cross section of the Permian Mao 1 Member gas reservoir, southeastern Sichuan Basin

部位的 DS1 井区茅一段裂缝较发育,气测显示活跃(图1),全烃最高达 57%,试获 $22.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;平桥背斜东翼受断层影响裂缝较发育,钻井全烃显示 5% ~ 20%,显示较好,试获 $8.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;而斜坡区或向斜区裂缝较不发育区的钻井气测显示较差,全烃基本在 2%。

5.2 勘探潜力

新领域的突破离不开地质认识的创新和勘探思路的转变,页岩气成藏机理和富集规律的认识促使天然气从常规转向非常规^[11-14,30-33],实现了勘探突破与开发建产,实现了从“源外”走向“源内”,相继发现了涪陵、长宁、威远、威荣和太阳等大中型页岩气田,累计探明储量 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。茅口组也正经历勘探思路的转变,逐渐认识到茅一段“源储一体型”页岩气的地质特征,为后期扩大资源规模奠定基础。

川东南地区茅一段为灰泥灰岩型页岩气,岩性组合有别于认识程度较高的五峰组-龙马溪组、牛蹄塘组硅质页岩型页岩气,但具备“自生自储、源储一体”的地质特点^[9],具有自身的地质特点与成藏特殊性。通过川东南地区茅一段灰泥灰岩沉积相、岩性和源储一体特征等研究,茅一段具备较好的页岩气成藏条件,结合前人对茅口组常规储层的理论认识与勘探实践^[2,19,35],川东南地区茅一段有利分布面积大于 7000 km^2 ,预测资源量超 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$,页岩气勘探潜力大,是重要的接替层系。

6 结论

1) 茅一段处于较深水外缓坡相沉积环境,地层岩

性以深灰色-灰黑色炭质泥岩、灰质泥岩、泥质灰岩和生屑灰岩为主,具备较好的生烃、储层和保存条件,为新类型非典型性页岩气。

2) 外缓坡相富有机质泥岩、灰质泥岩烃源岩提供良好的物质基础;茅一段有机质孔、溶蚀孔、粒缘缝和收缩缝等,可形成孔-缝-网优质储层;外缓坡相泥岩、泥质灰岩大面积分布并含气,裂缝发育区有利于富集高产,建立了茅一段“源储一体、连片分布以及构造-裂缝双重控藏”的新类型页岩气富集成藏模式。

3) 川东南地区茅一段作为新层系新类型页岩气藏,具备较好的页岩气成藏条件,茅一段连续分布面积 7000 km^2 ,预测资源量超 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$,是重要的接替层系,勘探潜力大。

参考文献

- [1] 马永生,何登发,蔡勋育,等. 中国海相碳酸盐岩的分布及油气地质基础问题[J]. 岩石学报,2017,33(4):1007-1026.
Ma Yongsheng, He Dengfa, Cai Xunyu, et al. Distribution and fundamental science questions for petroleum geology of marine carbonate in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1007-1026.
- [2] 张健,周刚,张光荣,等. 四川盆地中二叠统天然气地质特征与勘探方向[J]. 天然气工业,2018,38(1):10-20.
Zhang Jian, Zhou Gang, Zhang Guangrong, et al. Geological characteristics and exploration orientation of Mid-Permian natural gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(1): 10-20.
- [3] 汪泽成,江青春,黄士鹏,等. 四川盆地中二叠统茅口组天然气大面积成藏的地质条件[J]. 天然气工业,2018,38(1):30-38.
Wang Zecheng, Jiang Qingchun, Huang Shipeng, et al. Geological conditions for massive accumulation of natural gas in the Mid-Permian Maokou Fm of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(1): 30-38.
- [4] 黄士鹏,江青春,冯庆付,等. 川南地区中二叠统茅口组岩溶储集层类型与分布规律[J]. 石油勘探与开发,2019,46(2):281-

- 289.
- Huang Shipeng, Jiang Qingchun, Feng Qingfu, et al. Type and distribution of Mid-Permian Maokou Formation karst reservoirs in southern Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(2): 281–289.
- [5] 胡东风. 四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩天然气勘探的突破与启示[J]. *天然气工业*, 2020, 39(3): 99–110.
- Hu Dongfeng. Breakthrough in natural gas exploration in the platform margin shoal at the Maokou Fm in the Yuanba area, Sichuan Basin, and its implications [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 39(3): 99–110.
- [6] 王珏博, 谷一凡, 陶艳忠, 等. 川中地区茅口组两期流体叠合控制下的白云石化模式[J]. *沉积学报*, 2016, 34(2): 236–248.
- Wang Jue Bo, Gu Yifan, Tao Yan Zhong, et al. The model of dolomitization jointly controlled by two-episode fluids in Maokou Formation in central Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(2): 236–248.
- [7] 唐雪松, 谭秀成, 刘宏, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组白云岩及云质硅岩储层特征与发育规律[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 731–743.
- Tang Xuesong, Tan Xiucheng, Liu Hong, et al. Characteristics and development mechanism of dolomite and dolomitic quartzite reservoirs of the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5): 731–743.
- [8] 胡安平, 潘立银, 郝毅, 等. 四川盆地二叠系栖霞组、茅口组白云岩储层特征、成因和分布[J]. *海相油气地质*, 2018, 23(2): 39–52.
- Hu Anping, Pan Liyin, Hao Yi, et al. Origin, Characteristics and distribution of dolomite reservoir in Qixia Formation and Maokou Formation, Sichuan Basin, China [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2018, 23(2): 39–52.
- [9] 张涛, 林娟华, 韩月卿, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液白云岩发育模式及对储层的改造[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 132–143.
- Zhang Tao, Lin Juanhua, Han Yueqing, et al. Pattern of hydrothermal dolomitization in the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, and its alteration on reservoirs herein [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 132–143.
- [10] 杨天博, 何治亮, 金振奎, 等. 川西北中二叠统超深层白云岩储层孔隙结构及控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 116–131.
- Yang Tianbo, He Zhiliang, Jin Zhenkui, et al. Pore structure and controlling factors of the ultra-deep Middle Permian dolomite reservoirs, northwestern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 116–131.
- [11] 张金川, 金之钧, 袁明生. 页岩气成藏机理和分布[J]. *天然气工业*, 2004, 24(7): 15–18.
- Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(7): 15–18.
- [12] 聂海宽, 金之钧, 边瑞康, 等. 四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气“源—盖控藏”富集[J]. *石油学报*, 2016, 37(5): 557–571.
- Nie Haikuang, Jin Zhijun, Bian Ruikang, et al. The “source-cap hydrocarbon-controlling” enrichment of shale gas in Upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation of Sichuan Basin and its periphery [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(5): 557–571.
- [13] 朱彤, 胡宗全, 刘忠宝, 等. 四川盆地湖相页岩气源—储配置类型及评价[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(6): 1146–1153.
- Zhu Tong, Hu Zongquan, Liu Zhongbao, et al. Types and evaluation of the source-reservoir configuration of lacustrine shale gas in the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(6): 1146–1153.
- [14] 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): 463–473.
- 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): 463–473.
- [15] 郝毅, 姚倩颖, 田瀚, 等. 四川盆地二叠系茅口组沉积特征及储层主控因素[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(3): 202–209.
- Hao Yi, Yao Qianying, Tian Han et al. Sedimentary characteristics and reservoir-controlling factors of the Permian Maokou Formation in Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020, 25(3): 202–209.
- [16] 罗鹏, 李国蓉, 施泽进, 等. 川东南地区茅口组层序地层及沉积相浅析[J]. *岩性油气藏*, 2010, 22(2): 74–78.
- Luo Peng, Li Guorong, Shi Zejin, et al. Analysis of sequence stratigraphy and sedimentary facies of Maokou Formation in southeastern Sichuan [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 22(2): 74–78.
- [17] 李大军, 陈辉, 陈洪德, 等. 四川盆地中二叠统茅口组储层形成与古构造演化关系[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 756–763.
- Li Dajun, Chen Hui, Chen Hongde, et al. Relationship between reservoir development in the Middle Permian Maokou Formation and paleostructure evolution in the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5): 756–763.
- [18] 胡明毅, 胡忠贵, 魏国齐, 等. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 45–55.
- Hu Mingyi, Hu Zhonggui, Wei Guoqi, et al. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 45–55.
- [19] 黄先平, 杨天泉, 张红梅. 四川盆地二叠统沉积相及其勘探潜力区研究[J]. *天然气工业*, 2004, 24(1): 10–12.
- Huang Xianping, Yang Tianquan, Zhang Hongmei. Research on the sedimentary facies and exploration potential areas of Lower Permian in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(1): 10–12.
- [20] 黎荣, 胡明毅, 杨威, 等. 四川盆地中二叠统沉积相模式及有利储集体分布[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2): 369–379.
- Li Rong, Hu Mingyi, Yang Wei, et al. Sedimentary facies model and favorable reservoir distribution of the Middle Permian in Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(2): 369–379.
- [21] 梁狄刚, 郭彤楼, 陈建平, 等. 中国南海相生烃成藏研究的若干新进展(一)——南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. *海相*

- 油气地质,2008,13(2):1-16.
- Liang Digang, Guo Tonglou, Chen Jianping, et al. Some progresses on studies of hydrocarbon generation and accumulation in marine sedimentary regions, southern China (Part 1): Distribution of four suits of regional marine source rocks[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008,13(2):1-16.
- [22] 黄士鹏,江青春,汪泽成,等.四川盆地中二叠统栖霞组与茅口组烃源岩的差异性[J].天然气工业,2016,36(12):26-34.
- Huang Shipeng, Jiang Qingchun, Wang Zecheng, et al. Differences between the Middle Permian Qixia and Maokou source rocks in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2016,36(12):26-34.
- [23] 胡朝伟,胡广,张玺华,等.川西北地区茅口组上部黑色岩系的层位、沉积环境及生烃潜力评价[J].石油实验地质,2020,42(2):202-214.
- Hu Chaowei, Hu Guang, Zhang Xihua, et al. Sedimentary environment hydrocarbon potential and development of black rocks in upper Maokou Formation, northwestern Sichuan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020,42(2):202-214.
- [24] 张培先.黔中隆起及邻区下寒武统页岩气成藏特殊性分析[J].石油实验地质,2017,39(2):162-168.
- Zhang Peixian. Peculiar accumulation conditions for shale gas in the Lower Cambrian in Qianzhong uplift and its periphery[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017,39(2):162-168.
- [25] 郑和荣,彭勇民,唐建信,等.中、上扬子地区常压页岩气勘探前景——以湘中坳陷下寒武统为例[J].石油与天然气地质,2019,40(6):1155-1167.
- Zheng Herong, Peng Yongmin, Tang Jianxin, et al. Exploration prospect of normal pressure shale gas in Middle and Upper Yangtze regions: A case study of the Lower Cambrian shale in Xiangzhong Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2019,40(6):1155-1167.
- [26] 徐祖新.川东地区中二叠统茅口组天然气成因及气源[J].特种油气藏,2019,26(2):16-22.
- Xu Zuxin. Genesis and source of gas in middle Permian Maokou Formation of eastern Sichuan Basin [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2019,26(2):16-22.
- [27] 罗冰,文龙,张亚,等.四川盆地西北部栖霞组天然气差异成藏过程[J].石油与天然气地质,2020,41(2):393-406.
- Luo Bing, Wen Long, Zhang Ya, et al. Differential gas accumulation process of the Middle Permian Qixia Formation, Northwestern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020,41(2):393-406.
- [28] 吕文雅,苗凤彬,张本键,等.四川盆地剑阁地区须家河组致密砾岩储层裂缝特征及对天然气产能的影响[J].石油与天然气地质,2020,41(3):484-491.
- Lyu Wenya, Miao Fengbin, Zhang Benjian, et al. Fracture characteristics and their influence on natural gas production: A case study of the tight conglomerate reservoir in the Upper Triassic Xujiahe Formation in Jian'ge area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020,41(3):484-491.
- [29] 戴金星,夏新宇,秦胜飞,等.中国有机烷烃气碳同位素系列倒转的成因[J].石油与天然气地质,2003,24(1):1-11.
- Dai Jinxing, Xia Xinyu, Qin Shengfei, et al. Causation of partly reversed orders of $\delta^{13}\text{C}$ in Biogenic Alkane gas in China[J]. Oil & Gas Geology, 2003,24(1):1-11.
- [30] 郭彤楼,张汉荣.四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J].石油勘探与开发,2014,41(1):28-36.
- Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014,41(1):28-36.
- [31] 何治亮,聂海宽,张钰莹.四川盆地及其周缘奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析[J].地学前缘,2016,23(2):8-17.
- He Zhiliang, Nie Haikuan, Zhang Yuying. The main factors of shale gas enrichment of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(2):8-17.
- [32] 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 Yuqiao, et al. Geological characteristics and enrichment and high yield of normal pressure shale gas in the basin transition zone of the southeast Chongqing[J]. Natural Gas Industry, 2018,38(12):1-14.
- [33] 庾秀松,陈孔全,罗顺社,等.四川盆地东南缘齐岳山断裂构造特征与页岩气保存条件[J].石油与天然气地质,2020,41(5):1017-1027.
- Tuo Xiusong, Chen Kongquan, Luo Shunshe, et al. Structural characteristics of Qiyueshan Fault and shale gas preservation at the southeastern margin of Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020,41(5):1017-1027.
- [34] 田鹤,曾联波,徐翔,等.四川盆地涪陵地区海相页岩天然裂缝特征及对页岩气的影响[J].石油与天然气地质,2020,41(3):474-483.
- Tian He, Zeng Lianbo, Xu Xiang, et al. Characteristics of natural fractures in marine shale in Fuling area, Sichuan Basin, and their influence on shale gas[J]. Oil & Gas Geology, 2020,41(3):474-483.
- [35] 陈宗清.四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探[J].中国石油勘探,2007,12(5):1-11.
- Chen Zongqing. Exploration for natural gas in Middle Permian Maokou Formation of Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2007,12(5):1-11.

(编辑 梁 慧)