

引用: 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. Enrichment and high yield of shale gas in the Permian Wujiaping Formation in Hongxing area of eastern Sichuan and its exploration implications[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(1):71-82.

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

包汉勇 赵帅 梁榜 周林 刘皓天

(中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院)

摘 要: 四川盆地二叠系吴家坪组的页岩层普遍受沉积相变快、厚度薄、埋深大等地质条件的制约, 非常规天然气勘探一直未有大的突破。2020 年风险探井 HY-1HF 井在二叠系吴家坪组试获 $8.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流, 展现了川东红星地区二叠系吴家坪组页岩气良好的勘探潜力。为了厘清二叠系页岩气富集高产的主控因素及其对勘探的启示意义, 对钻井、测井、地球化学分析等资料进行研究。结果表明, 该地区吴家坪组二段整体发育深水陆棚相沉积, 页岩储层具有有机碳含量 (TOC) 高、孔隙度高、含气量高、碳酸盐含量高, 以及页岩厚度薄 (小于 20m) 的“四高一薄”特征, 结合优良的顶底板封隔条件, 是优质的深层海相页岩气勘探层系。通过有利区评价认为, 川东龙驹坝、建南及三星区块为红星地区的有利勘探区。

关键词: 富集高产; 成藏条件; 吴家坪组; 二叠系; 红星地区; 四川盆地

中图分类号: TE112.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.01.007

Enrichment and high yield of shale gas in the Permian Wujiaping Formation in Hongxing area of eastern Sichuan and its exploration implications

Bao Hanyong, Zhao Shuai, Liang Bang, Zhou Lin, Liu Haotian

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Jiangnan Oilfield Company)

Abstract: Constrained by geological conditions such as rapid facies change, thin thickness, and great burial depth of shale formation in the Permian Wujiaping Formation in Sichuan Basin, no major breakthrough has been made in unconventional gas exploration. In 2020, a risk exploration well HY-1HF was drilled and commercial gas flow of $8.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ was obtained during well test, showing good exploration potential of shale gas in the Permian Wujiaping Formation in Hongxing area of eastern Sichuan Basin. In order to identify the main controlling factors for the enrichment and high yield of the Permian shale gas and its exploration implications, well drilling, logging and geochemical experiment data are analyzed. The study results indicate that deposits of deep-water shelf facies were generally developed in the second member of Wujiaping Formation (Wu 2 member), as well as high-quality organic-rich shale, with the characteristics of “four high and one thin”, namely, high TOC, high porosity, high gas content, high carbonate content and thin shale reservoir thickness (<20 m). Hongxing area is located in the tectonically stable zone, with good preservation conditions; In addition, the reservoir is conducive to fracture treatment owing to its rock mechanical features of low Young's modulus and Poisson's ratio. On the whole, it is a high-quality deep marine formation for shale gas exploration in combination with the excellent sealing conditions of roof and floor. The evaluation results conclude that Longjuba, Jiannan and Sanxing blocks are favorable exploration zones in Hongxing area of eastern Sichuan Basin.

Key words: enrichment and high yield, hydrocarbon accumulation conditions, Wujiaping Formation, Permian, Hongxing area, Sichuan Basin

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科研项目“四川盆地及周缘江汉探区天然气富集规律与目标评价”(P20059-5); “红星—宜昌常压页岩气富集高产机理与目标评价”(P21087-2)。

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: 2022-06-21; 修改日期: 2022-12-29

0 引言

目前页岩气已经逐渐成为我国天然气产业核心增长点^[1-4]。国内在四川盆地及其周缘上奥陶统五峰组一下志留统龙马溪组海相页岩先后发现了长宁、涪陵、威远、威荣等多个页岩气田^[5-6]，探明地质储量超 $2 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。为进一步加快落实我国页岩气资源规模，新领域、新层系的勘探研究尤为重要^[7]。在新领域方面，2020年，我国页岩气产量超过 $200 \times 10^8 \text{m}^3$ ，大部分产自埋深3500m以浅的海相页岩区^[8-9]，对于深层页岩气的勘探仍然较为薄弱^[10-11]。在新层系方面，四川盆地二叠系是我国南方常规天然气的烃源岩层，发现了普光、元坝等大型常规天然气田，展现出二叠系页岩良好的生烃潜力，但由于该套页岩相变快、厚度薄、分布相对局限，一直未被作为非常规页岩气进行勘探，导致二叠系页岩的勘探和研究程度较薄弱^[12]。

“十三五”以来，逐步明确川东地区二叠系页岩具有分布面积广、原生品质好等优势，同时存在厚度薄、非均质性强、埋藏深度大等不利因素。通过对老井、露头资料的系统复查，持续深化鄂西渝东、湘鄂西区块二叠系页岩气的基础研究，评价认为在中二叠世晚期—晚二叠世，区域内普遍发育泥页岩，并且原生品质较好。建立了选区评价参数，落实了红星地区石柱复向斜为勘探优选有利区，吴家坪组二段（吴二段）为有利层系。川东红星地区针对二叠系茅口组—吴家坪组部署钻探的HY-1井2020年10月25日导入管网进行试采，截至2022年2月28日累计生产485天，井口套压为5.75MPa，日产气 $3.06 \times 10^4 \text{m}^3$ ，累计产气 $2221 \times 10^4 \text{m}^3$ 。HY-2井2022年1月1日导入管网进行试采，截至2022年2月21日累计生产51天，井口套压为12.10MPa，日产气 $6.026 \times 10^4 \text{m}^3$ ，累计产气 $732.32 \times 10^4 \text{m}^3$ 。实现了川东红星地区二叠系新层系页岩气勘探的重大突破，拉开了我国南方二叠系页岩气勘探与开发的序幕。

本文基于红星地区二叠系吴家坪组页岩气勘探实践，系统分析了吴二段的页岩地质特征及富集主控因素，丰富了中国南方海相页岩气的勘探认识与实践，以期对整个四川盆地二叠系实现高效勘探开发提供借鉴和指导。

1 区域地质背景

二叠纪是地质历史中构造活动最活跃的时期之

一，其中，峨眉山玄武岩的喷发、东吴运动以及海平面的剧烈变化，对二叠纪的构造格局和沉积环境产生了重要影响^[13-14]。华南板块整体在二叠纪受南北向伸展构造的控制，发育了一系列的大陆边缘裂陷和陆内裂陷^[15]。川东红星及周缘地区自二叠纪中期开始由克拉通内拗陷演化为台内裂陷^[16-18]。晚二叠世，受东吴运动的影响，四川盆地在峨眉地幔柱活动的作用下，古地理格局总体表现为西南高、东北低^[19-21]。中上扬子地区北缘发育北东向及北西向的裂陷，裂陷内的川东区红星、复兴、恩施一带以及川北区广元、旺苍、南江一带为深水陆棚相区，暗色泥页岩广泛发育。

红星地区地理位置上位于重庆市石柱县和湖北省利川市境内，在构造上隶属川东隔挡式褶皱带石柱复向斜中部，夹持在齐岳山复背斜和方斗山复背斜之间，两个高陡褶皱带呈北东—北东东走向，为狭长的“S”状弧形展布。复向斜比复背斜更加宽缓，使得该区构造形态更具有“隔挡式”构造的典型特征（图1）。平面上，自北向南发育3排北东—北东东走向的高陡背斜，依次是龙驹坝背斜、建南背斜和盐井背斜。其中位于石柱复向斜中部的建南背斜以二叠系构造为主体，主要受太平镇断层所控制，为一个保存较完整的箱状背斜。吴家坪组底界埋深在3000~4800m之间，为多层次滑脱的阶梯状断层传播褶皱的构造样式，主控断层向上消失在嘉陵江组页岩地层中。

2 气藏基本地质条件

我国南方二叠纪时期构造运动复杂，泥页岩热演化程度高，保存条件的好坏是该地区页岩气富集高产的关键因素。页岩气藏形成的地质条件及评价要素包括页岩厚度、埋藏深度、有机碳及吸附气含量、有机质类型及成熟度、脆性矿物含量、地层压力与温度、储层物性、天然裂缝发育程度及含气量等^[22]。

2.1 二叠系吴家坪组沉积特征

川东二叠系与下伏泥盆系—石炭系呈平行不整合接触，上覆地层为三叠系飞仙关组^[23]。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）。

在四川盆地西南部至中部一带，吴家坪组也被称为龙潭组，发育海陆过渡相页岩，属于同期异相。吴家坪组纵向上可划分为两个亚段，目的层段吴二段（以HY-1井为例），依据岩性、电性、矿物成分等资料，自下而上分为5个小层，总厚度为19.1m。

岩性主要以灰黑色硅质页岩夹泥质页岩、泥质灰岩为主。纵向上②小层厚 1.2~1.5m，分布较为稳定，为

致密泥质灰岩层；①、③、④、⑤小层为黑色硅质页岩及泥质页岩，③小层厚度最大（图 2）。

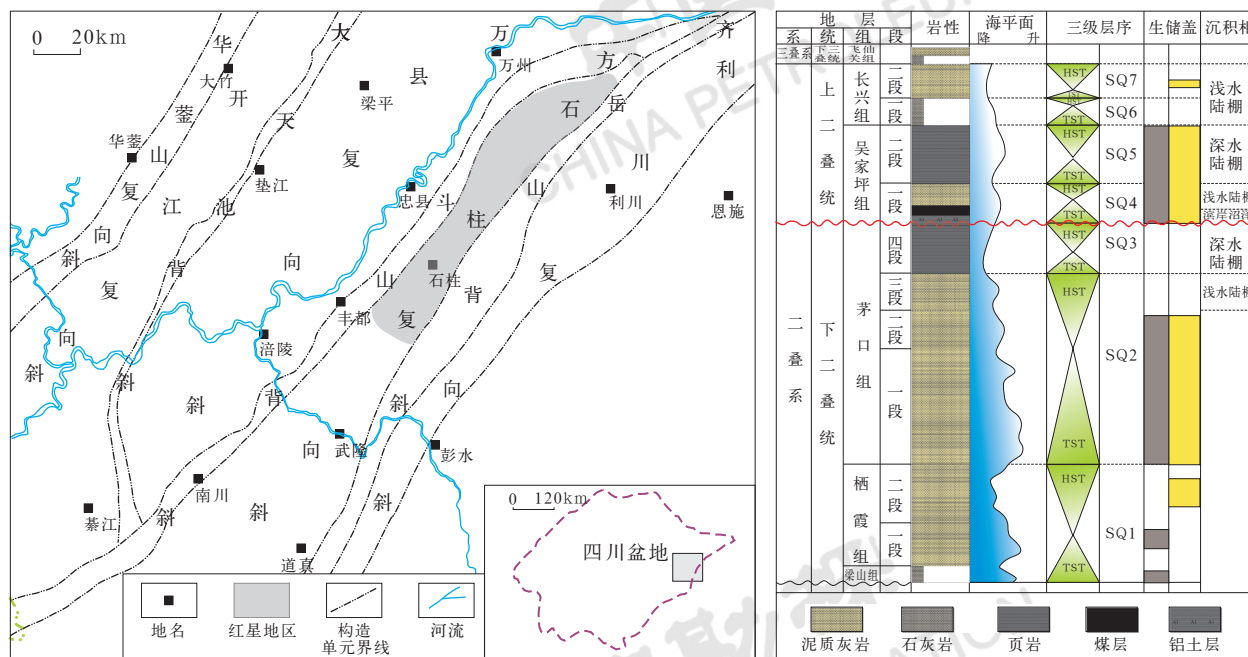


图 1 川东地区构造图（左）和二叠系综合柱状图（右）

Fig.1 Structural map (left) and comprehensive stratigraphic column (right) of the Permian of eastern Sichuan Basin

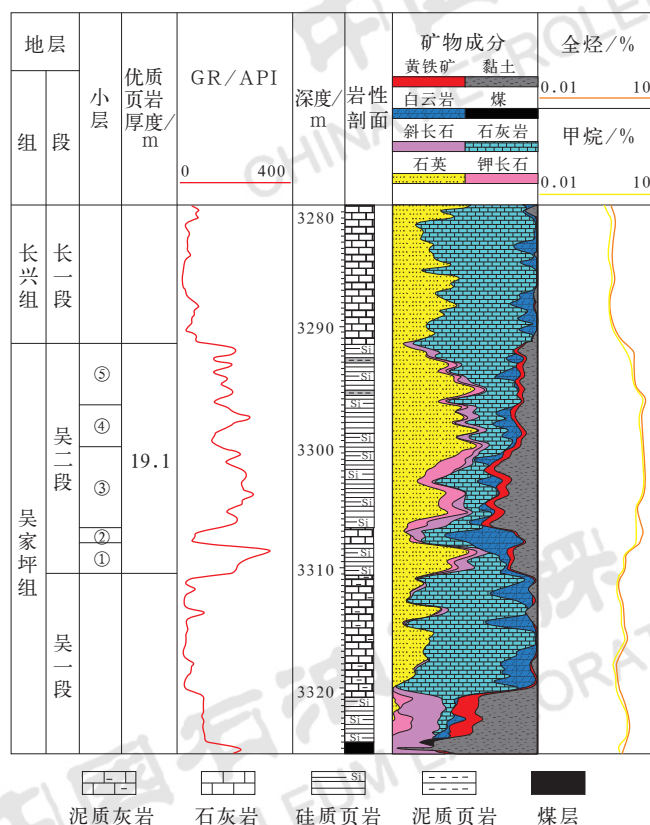


图 2 红星地区 HY-1 井二叠系综合评价图

Fig.2 Comprehensive evaluation graph of the Permian in Well HY-1 in Hongxing area

二叠系吴家坪组形成了明显的构造沉积分异现象，由西南向东北方向，由海陆过渡相演变为深水陆棚相，不同沉积相带的岩相组合存在明显差异。受控于西高东低的古地貌以及海水西侵作用，川西、川中主要为滨岸沼泽煤系沉积，川东为浅水—深水陆棚相沉积（图 3）。

2.2 页岩品质特征

根据页岩发育的沉积环境，可以将有机质页岩划分为陆相、海相和海陆过渡相^[24-26]。红星地区二叠系吴二段页岩为海相页岩，沉积环境为深水陆棚。根据 HY-1 井等钻井揭示，吴二段页岩具有高有机碳含量、高孔隙度、高含气量、高碳酸盐含量，且页岩储层厚度薄（小于 20m）的“四高一薄”特征。

2.2.1 地球化学特征

通过对 HY-1 井 37 个样品及 HY-2 井 41 个样品进行有机碳分析测试，结果显示，HY-1 井吴二段页岩有机碳含量在 0.63%~13.17% 之间，平均为 8.77%（表 1），其中①小层 TOC 最高，③、④、⑤小层 TOC 相对较小，②小层由于是石灰岩层段，所以 TOC 低。HY-2 井吴二段页岩 TOC 平均为 6.59%，其中③、④、⑤小层 TOC 较高，分别为 8.85%、7.15%

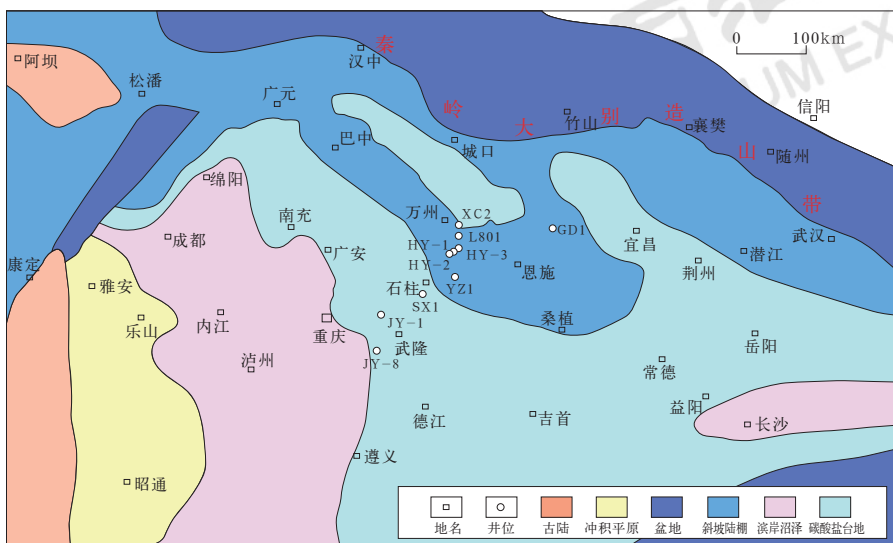


图3 中上扬子上二叠系吴家坪组沉积相图

Fig.3 Sedimentary facies map of the Upper Permian Wujiaping Formation in the Middle–Upper Yangtze region.

表1 HY-1井、HY-2井吴二段各小层TOC统计表

Table 1 TOC statistics of each thin layer in the second member of the Wujiaping Formation in Well HY-1 and Well HY-2

小层	HY-1 井		HY-2 井	
	平均 TOC/%	样品数量 / 个	平均 TOC/%	样品数量 / 个
⑤	7.02	11	5.60	12
④	8.76	8	7.15	7
③	8.77	9	8.85	12
②	0.63	4	0.07	2
①	13.17	5	4.75	8

和 5.60%。相比 HY-2 井, 除③小层基本一致外, HY-1 井其他各小层的平均 TOC 均高于 HY-2 井, 平面上 TOC 有由南向北增大的趋势。

HY-1 井吴二段的干酪根碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 介于 $-28.0\text{‰} \sim -26.0\text{‰}$, 有机质类型以 II_1 型为主; 镜质组反射率 (R_o) 介于 $2.0\% \sim 2.6\%$, 处于过成熟阶段。综合上述地球化学特征认为, 川东红星地区吴二段具有良好的有机地球化学条件和生烃基础。

2.2.2 页岩物性特征

研究区 HY-1 井吴二段页岩整体孔隙度较大,

平均为 5.58%，有机质孔发育，孔径相对较小。从孔隙结构来看，介孔与微孔占据绝大多数，大孔则相对较少（表 2）。这与同为海相页岩的涪陵地区五峰组—龙马溪组的孔隙类型不一致，但有机质孔和微裂缝均较发育，孔隙结构以介孔为主^[27]。HY-1 井吴二段页岩段采用氦气法测定岩石孔隙度样品共 16 块，从测试结果来看，吴二段页岩储集物性整体较好，孔隙度在 3.03%~9.88% 之间，其中③小层的孔隙度在 3.96%~9.88% 之间，平均为 6.40%（表 2）。

表 2 HY-1 井吴二段各小层孔隙度及孔隙类型统计表

Table 2 Statistics of porosity and pore type of each thin layer in the second member of Wujiaping Formation in Well HY-1

小层	孔隙度 / %			孔隙占比 / %		
	平均	最大	最小	微孔	介孔	大孔
⑤	5.00	5.76	4.18	51.6	37.9	10.5
④	5.35	7.01	4.60	55.4	33.0	11.6
③	6.40	9.88	3.96	78.3	6.0	15.7

续表

小层	孔隙度 /%			孔隙占比 /%		
	平均	最大	最小	微孔	介孔	大孔
②	—	—	—	63.9	29.5	6.6
①	3.63	4.23	3.03	82.4	10.1	7.5

氩离子抛光扫描电镜结果显示,吴二段页岩总体发育 5 种孔隙类型(图 4),分别为有机质孔、黏土矿物孔、颗粒粒内孔、颗粒边缘孔和微裂缝,其中有机质孔为主要的孔隙类型。无机孔和微裂缝发育较少,仅见少量的颗粒边缘孔、粒内孔和黏土矿物孔和微裂缝。

2.3 含气性特征

HY-1 井吴二段的岩心解析气含气量测定结果显示(表 3),含气量为 2.82~4.35m³/t,平均为 3.74m³/t,除⑤小层泥质灰岩段含气量较低外,其他各小层均大于 3.0m³/t,其中①、③小层含气量较高,最高达到 4.35m³/t。HY-2 井含气量在 2.14~5.49m³/t,平均为 3.99m³/t,高于 HY-1 井。两口井的含气量普遍较高,总体含气性好。

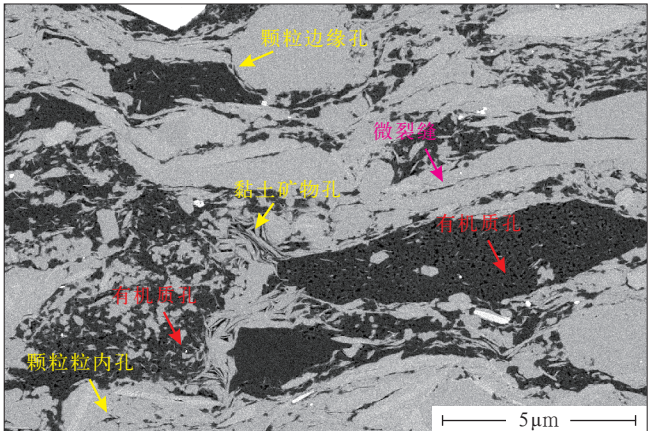


图 4 HY-1 井纳米级孔隙氩离子抛光扫描电镜照片
Fig.4 Argon ion polishing scanning electron microscope image of nano-scale pores in Well HY-1

表 3 HY-1 井及 HY-2 井吴二段各小层含气性评价表

Table 3 Evaluation of gas-bearing properties of the second member of Wujiaping Formation in Well HY-1 and Well HY-2

小层	HY-1 井			HY-2 井		
	气测显示		含气量 /(m ³ · t ⁻¹)	气测显示		含气量 /(m ³ · t ⁻¹)
	全烃 /%	甲烷 /%		全烃 /%	甲烷 /%	
⑤	3.71	3.14	2.82	11.69	8.61	3.00
④	4.80	4.41	3.47	13.83	11.83	5.49
③	4.98	4.70	4.35	10.33	7.72	5.31
②	—	—	—	—	—	—
①	1.78	1.64	4.33	6.18	4.93	2.14

HY-1 井吴二段全烃为 1.78%~4.98%,其中③、④小层相对更高,平均值分别为 4.98%和 4.80%,甲烷含量平均值分别为 4.70%和 4.41%(表 3)。HY-2 井吴二段气测显示活跃,全烃在 6.18%~13.83%之间,平均为 10.5%;甲烷含量在 4.93%~11.83%之间,平均为 8.27%,总体含气性较高。

2.4 岩石矿物特征

红星地区吴二段元素测井、全岩衍射等数据表明,矿物组分以石英为主,其次为碳酸盐和黏土,另见黄铁矿和长石(图 5)。页岩段 31 个样品

的实测黏土矿物含量在 5.0%~57.2%之间,平均为 20.4%;石英含量在 12.5%~83.2%之间,平均为 44.2%;斜长石含量为 0~8.7%,平均为 3.8%;方解石含量为 2.1%~63.5%,平均为 18.0%;白云石含量为 0~17.8%,平均为 3.8%;黄铁矿含量为 1.0%~20.5%,平均为 8.4%。总体来看,相较于五峰组—龙马溪组,红星地区吴二段页岩具有石英、碳酸盐、黄铁矿含量相对较高,黏土矿物含量相对较低的特征,纵向上除⑤小层上部灰质含量较高外,其他小层组分含量差异不大。黏土矿物主要为伊/蒙混层和伊利石,占比分别为 59%、41%。

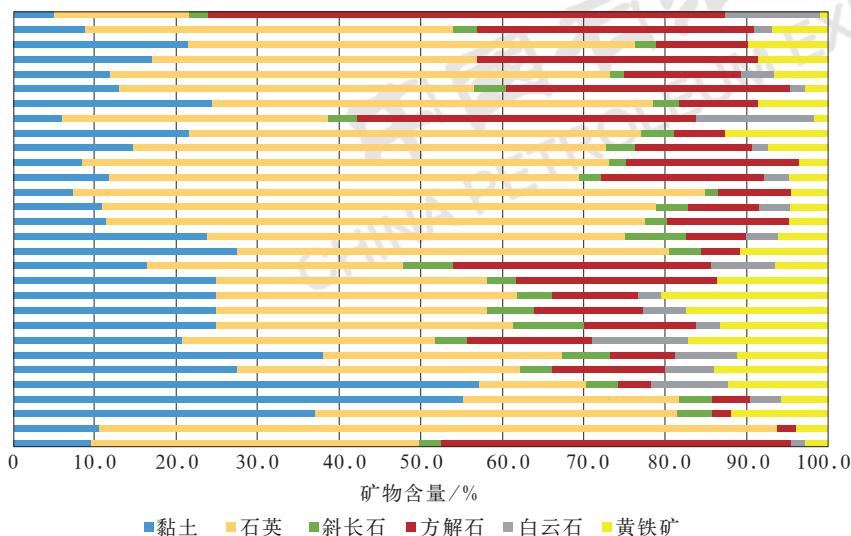


图5 红星地区 HY-1 井吴二段矿物含量图

Fig.5 Mineral composition of the second member of the Wujiaping Formation in Well HY-1 in Hongxing area

3 富集高产的主控因素

3.1 优质的富有机质页岩是富集高产的物质基础

3.1.1 有机碳含量

HY-1 井吴二段主要发育硅质页岩，部分夹泥质灰岩及凝灰岩，有菊石等生物化石，是典型的深水环境指标。岩性组合由泥页岩夹煤层、砂泥灰互层，向泥页岩夹石灰岩转变，整体上表现为煤层不断减少，硅质和灰质含量逐渐增加。吴二段整体处于深水陆棚相，主要发育硅质页岩。HY-1 井除②小层外，还发育灰质泥岩及泥质灰岩，所以整体 TOC 较高。各段 TOC、孔隙度、含气量具有良好正相关性（图 6）。页岩品质是产气贡献的内在决定因素，③小层页岩品质最好，因此产气贡献率相对较高。

3.1.2 有机质类型及热演化程度

吴家坪组纵向上慢速海侵、慢速海退，表现为一个完整的沉积旋回。同时，普遍具有干酪根碳同位素值逐渐变轻的规律，由下往上，有机质类型从Ⅲ型变化为Ⅱ型。吴二段生烃母质以藻类为主，有机质类型为Ⅱ₁型，腐泥组含量增加。镜质组反射率（ R_o ）是反映有机质热演化程度的重要指标，吴二段镜质组反射率平均为 2.3%，处于干气生成阶段。

在吴二段的页岩薄片普遍可见放射虫，这是深水陆棚相的典型特征。同时扫描电镜照片上普遍显示草莓状黄铁矿，微量元素指示水体安静，处于还原环

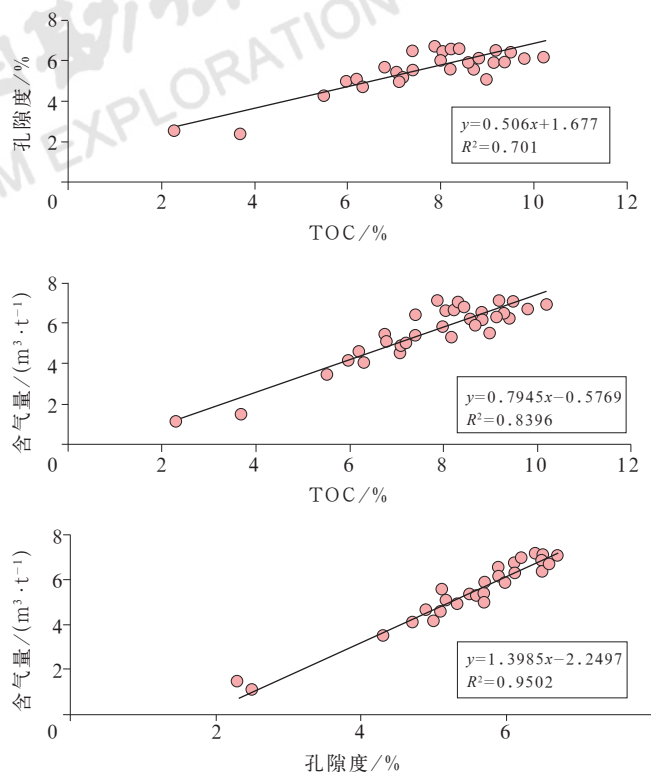


图6 HY-1 井有机碳—孔隙度—含气量交会图

Fig.6 Crossplot of TOC-porosity-gas content in Well HY-1

境，古盐度和古生产力指标均很高，以上证据均指示吴二段处于深水还原沉积环境。有机质页岩厚度介于 5~30m，整体呈现西薄东厚的变化特征。

平面上，上二叠统吴家坪组（龙潭组）是发育在东吴运动剥蚀夷平面之上的一套陆相、海陆过渡相、

浅水—深水陆棚相（有机质类型相应为Ⅲ、Ⅱ₂、Ⅱ₁型）、沉积类型多样、岩石组合类型复杂的沉积地层（图 7）^[28]。滨岸沼泽一带的 SY-1 井吴二段页岩有机质类型以Ⅲ型为主，TOC 含量较高，碳质页岩较发育，黏土含量普遍较高。潮坪相（SYX 井）和深水陆棚相（HY-1 井）的吴二段有机质类型主体为Ⅱ₁—Ⅱ₂型，TOC 由浅水陆棚到深水陆棚逐渐升高。斜坡相的 SX1 井有机质类型以Ⅱ₁型为主，TOC 与深水区的 HY-1 井保持一致（表 4），这也表现出从西向东水体逐渐加深的过程。

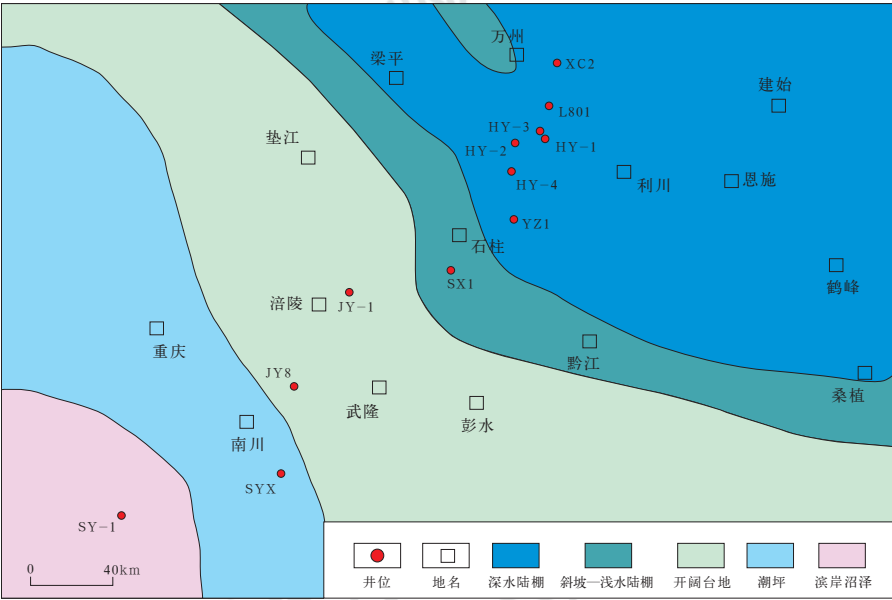


图 7 四川盆地东缘吴二段沉积相平面图

Fig.7 Sedimentary facies map of the second member of Wujiaping Formation in the eastern margin of Sichuan Basin

表 4 川东地区不同类型吴家坪组（龙潭组）页岩基本特征对比

Table 4 Comparison of basic shale characteristics with different facies types in Wujiaping Formation (Longtan Formation) in eastern Sichuan Basin

参数类型		滨岸沼泽相 (SY-1 井)	潮坪相 (SYX 井)	斜坡相 (SX1 井)	深水陆棚相 (HY-1 井)
生烃条件	有机质类型	Ⅲ型为主	Ⅱ ₂ 型	Ⅱ ₁ 型	Ⅱ ₁ 型
	有机碳含量 /%	4.3	2.2	9.2	8.8
	镜质组反射率 /%	2.3	1.9	2.1	2.3
储集条件	有机质孔	不发育	较发育	不发育	发育
	孔隙度 /%	2.67~9.74	—	5.8	3.03~8.05
可压裂性	黏土矿物含量 /%	55	34	—	17
	碳酸盐含量 /%	10	25.3	—	29
	杨氏模量 /GPa	22.5	40	—	42

3.2 良好的保存条件是天然气富集高产的关键因素

深层页岩气的保存条件与构造位置、构造活动期次、断裂特征及流体的活动强度、期次等密切相关。一般情况下，由于深层页岩气所经历的构造抬升剥蚀较少，所以保存条件相对较好^[29-30]。

红星及周缘地区的地表核部出露中侏罗统沙溪庙组，两翼出露上侏罗统遂宁组砂岩，保存条件最好。北部的龙驹坝构造处于齐岳山复背斜和方斗山复背斜交会处，地层高陡、断层通天，地表多出露三叠系，保存条件差。南部的盐井区域靠近沙子关断层，保存条件也较差（图 8）。

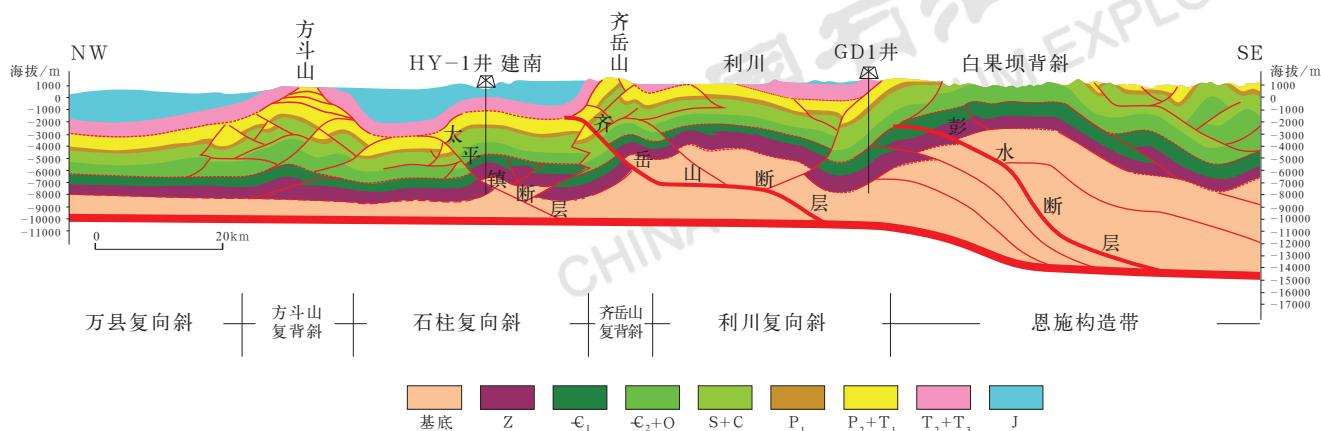


图8 红星及周缘地区构造剖面图

Fig.8 Structural section of Hongxing and its peripheral areas

从实钻井显示和含气性特征来看, HY-1 井吴二段平均含气量为 $3.74\text{m}^3/\text{t}$, GD1 井吴二段平均含气量为 $2.20\text{m}^3/\text{t}$ 。综上所述, 位于建南背斜构造稳定带的 HY-1 井吴二段与茅四段的含气量, 均明显好于逆冲带上构造复杂带的 GD1 井 (图 8)。从顶底板条件来看, 吴二段上部为长兴组石灰岩, 区域厚度为 $150\sim 200\text{m}$; 底板是茅口组顶部致密石灰岩, 区域厚度为 $30\sim 50\text{m}$, 更有利于页岩气的保存。

3.3 良好的可压裂性是页岩气富集高产的控制因素

裂缝及层理缝发育情况与纵向岩性具有一定关系, 岩性变化段易发育裂缝, 同时伴有地层倾角变化, 微幅挠曲段易发育构造缝。HY-1 井测井解释构造缝主要发育在水平井压裂分段的第 11 和第 32—33 段, 裂缝发育段产气贡献率普遍较低。第 11 段测井解释裂缝发育, 产气贡献率仅为 0.56% ; 第 32—33 段裂缝发育, 贡献率小于 3% 。

从 HY-1 井产能测试情况来看, 影响产气贡献的主要因素有穿行层位、应力性质和裂缝发育情况, 通过实钻井统计, 吴二段③小层主要为硅质页岩, 其 TOC、孔隙度、含气量最高, 页理最发育, 是最优质的甜点层位。从压裂施工效果来看, 穿行在吴二段中部天然裂缝相对不发育区, 初期裂缝破裂压力高, 形成裂缝以后延伸顺利, 提升砂比过程中压力小幅波动爬升, 稳定排量, 控制中砂砂比, 能够保证裂缝顺利延伸。穿行在顶底板石灰岩和页岩界面处, 初期破裂压力高, 加砂后地层压力上升至限压, 裂缝起裂难度大, 改造困难。

对比不同埋深 ($3300\sim 4200\text{m}$) 的 3 口井 (HY-1 井、HY-2 井、HY-3 井), HY-3 井相同小层含气性差异小 (表 5)。平面上从南往北水体加深, 碳酸盐含量降低, HY-3 井位于最北边 (图 7), 页岩厚度最大, 吴二段③小层页理最发育, 杨氏模量均比 HY-1 井、HY-2 井低, 说明后期压裂改造更加困难。

表 5 HY-1 井、HY-2 井、HY-3 井吴二段各小层岩石力学参数表

Table 5 Rock mechanical parameters of the second member of Wujiaping Formation in wells HY-1, HY-2 and HY-3

小层	HY-1 井			HY-2 井			HY-3 井		
	破裂压力 / MPa	杨氏模量 / GPa	泊松比	破裂压力 / MPa	杨氏模量 / GPa	泊松比	破裂压力 / MPa	杨氏模量 / GPa	泊松比
⑤	88.07	53.63	0.19	99.23	52.08	0.23	105.1	55.62	0.23
④	88.18	50.26	0.19	97.38	49.02	0.22	102.4	50.85	0.20
③	88.63	41.05	0.21	96.46	42.10	0.21	101.7	40.59	0.20
②	94.07	73.47	0.26	104.33	74.10	0.24	114.3	75.17	0.29
①	90.41	53.17	0.22	99.94	55.25	0.23	102.4	49.71	0.20

不同构造区也会造成施工难度的差异，影响压裂效果。其中挤压应力区开井压力及延伸压力升高，压裂难度增加。靠近断层和天然裂缝发育区，近井筒裂缝复杂，延伸过程中动态滤失大，难以形成优势主缝，会增加施工压裂难度。

4 勘探开发启示

4.1 二叠系页岩气勘探开发前景良好

四川盆地二叠系页岩气资源丰富，其中川东红星地区的页岩气有利区带主要集中在龙驹坝、建南及三星区块（图 9），红星地区二叠系吴二段页岩构造变

形程度弱，裂缝发育程度低，顶底板封隔条件优良，埋深较大。吴二段面积分布广，资源量较为丰富，总资源量达到了 $6985.96 \times 10^8 \text{m}^3$ ，平均资源丰度达到了 $2.51 \times 10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$ （表 6），是下一步页岩气勘探开发的重点区域及层系。

4.2 高品质薄层页岩具有商业开发潜力

红星地区海相页岩气的成功试采，打破了北美对页岩厚度在 30m 以下不具备工业开发价值的认识^[31]。因此，页岩层能否商业开发，应该是受有机质页岩厚度、孔隙度、含气量等多因素乘积的影响。当页岩孔隙度及含气量足够大时，厚度略小也能有效开发。

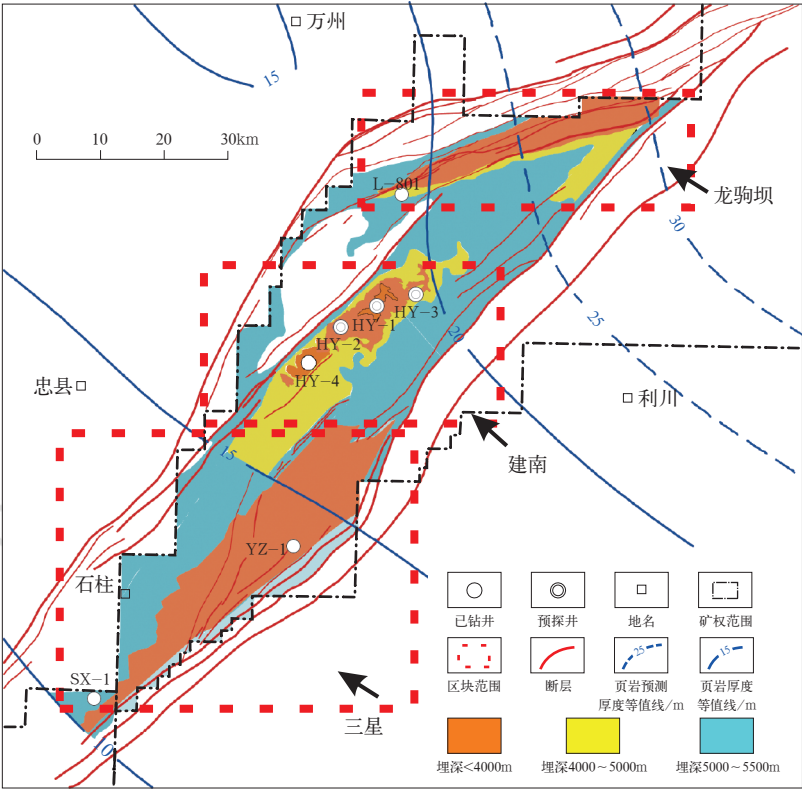


图 9 红星地区吴二段页岩气有利区评价图

Fig.9 Evaluation of favorable areas for shale gas exploration in the second member of Wujiaping Formation in Hongxing area

表 6 红星地区吴二段资源量统计表

Table 6 Statistics of shale gas resources in the second member of Wujiaping Formation in Hongxing area

区块	埋深 /m	页岩厚度 /m	含气饱和度 /%	面积 /km ²	总资源量 /10 ⁸ m ³	资源丰度 /(10 ⁸ m ³ · km ⁻²)
龙驹坝	<3500	20	65	185	453.12	2.45
	3500~4500	20	65	244	597.63	2.45
	4500~5500	20	65	293	716.07	2.44

续表

区块	埋深 /m	页岩厚度 /m	含气饱和度 /%	面积 /km ²	总资源量 /10 ⁸ m ³	资源丰度 /(10 ⁸ m ³ · km ⁻²)
建南	<3500	18	78	4	12.41	3.10
	3500~4500	18	78	344	1066.93	3.10
	4500~5500	18	78	621	1926.05	3.10
三星	<3500	12	75	314	630.78	2.01
	3500~4500	12	75	579	1163.12	2.01
	4500~5500	12	75	209	419.85	2.01
合计 / 平均		150	72.7	2793	6985.96	2.51

美国五大含气页岩的有机碳含量均较高^[32], 其中 Barnett 页岩 TOC 介于 2.0%~7.0%, 平均为 4.5%, 而红星地区钻井的目的层段 TOC 平均值 (8.77%) 则远高于此。根据北美地区统计资料, 页岩气成藏要求 $R_o > 1.3\%$, 而红星地区 SXY 井吴家坪组页岩 R_o 的最小值 (1.9%) 也高于此标准。美国主要产气页岩储层总孔隙度分布在 2.0%~14.0% 之间, 平均为 4.22%~6.51%, 这一点也与红星地区平均孔隙度 (5.32%) 相当。基于以上参数, 北美提出有机质页岩的厚度应大于 30m。但是对于红星地区的海相页岩来说, 以上各方面参数与之持平, 甚至优于北美页岩储层, 页岩厚度并不是能否商业开采的唯一标准。

综上所述, 针对四川盆地二叠系厚度不足 30m 的有机质页岩, 亟待提出一套新的、更加完善的二叠系页岩储层评价体系。

4.3 高钙高硅页岩储层可有效减小压裂难度

根据前期五峰组—龙马溪组深层海相页岩气的开采情况, 与浅层页岩气相比, 深层覆压的增大使储层孔隙度降低、渗透率降低, 裂缝对渗透性的贡献显著下降。并且随着地层温度升高, 地应力变大且应力差值变高, 页岩的塑性变强, 导致裂缝起裂及延伸困难。

但是, 硅质页岩段的石英含量高, 抗压实作用强, 有利于储层的形成和保存^[33]。富有机质硅质页岩相、富有机质碳酸盐质—硅质页岩相及富有机质硅质—碳酸盐页岩相因具有高 TOC 和高脆性特征, 不仅保证了页岩良好的生气能力也兼顾了较好的可压裂性, 是最优质的岩相类型^[34]。随着石英含量增加, 杨氏模量增加, 泊松比减小, 表明脆性越来越强^[35]。同时,

碳酸盐矿物中方解石含量高的层段更易于溶蚀产生溶孔。当硅质、钙质矿物成分越高, 在页岩储层加砂压裂时, 更易发生脆性断裂从而形成网状裂缝, 即更有利于压裂改造。

综上所述, 红星地区二叠系海相页岩储层具有富硅、富碳酸盐、整体脆性矿物含量高、相对易改造等优点。

5 结论

川东红星地区二叠系吴家坪组具备极高的资源丰度, 吴二段③小层集优质的“高硅、高碳”的富有机质页岩, 以及良好的保存条件、可压裂性为一体, 是极好的页岩气富集“甜点”层段。川东龙驹坝、建南及三星区块由于页岩分布范围广、原生品质好、资源规模大, 是红星地区二叠系页岩的有利勘探区。明确了红星地区吴二段主要发育深水陆棚相沉积而非海陆过渡相沉积, 同时, 打破了薄层页岩不具备商业开采的固有认识。

参考文献

- [1] 金之钧, 蔡勋育, 刘金连, 等. 中国石油化工股份有限公司近期勘探进展与资源发展战略 [J]. 中国石油勘探, 2018, 23(1): 14–25.
Jin Zhijun, Cai Xunyu, Liu Jinlian, et al. Recent exploration progress and resource development strategy of China Petroleum & Chemical Corporation [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(1): 14–25.
- [2] 蔡勋育, 刘金连, 张宇, 等. 中国石化“十三五”油气勘探进展与“十四五”前景展望 [J]. 中国石油勘探, 2021, 26(1): 31–42.
Cai Xunyu, Liu Jinlian, Zhang Yu, et al. Sinopec: progress in oil and gas exploration during the 13th Five-Year Plan period and prospects for the 14th Five-Year Plan period [J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(1): 31–42.
- [3] 孙焕泉, 周德华, 蔡勋育, 等. 中国石化页岩气发展现状与趋势 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 14–26.

- Sun Huanquan, Zhou Dehua, Cai Xunyu, *et al.* Progress and prospects in shale gas development of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(2):14–26.
- [4] 邹才能, 赵群, 王红岩, 等. 非常规油气勘探开发理论技术助力我国油气增储上产[J]. 石油科技论坛, 2021,40(3):72–79.
- Zou Caineng, Zhao Qun, Wang Hongyan, *et al.* Theory and technology of unconventional oil and gas exploration and development helps china increase oil and gas reserves and production[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(3):72–79.
- [5] 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. Analysis on the main controlling factors of shale gas enrichment in the Ordovician Wufeng Formation–Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin and its surrounding areas[J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(2):8–17.
- [6] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组—龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016,23(1):1–10.
- Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, *et al.* Controlling factors of shale gas enrichment and high production in Wufeng Formation–Longmaxi Formation in southeastern Sichuan[J]. Frontiers in Geoscience, 2016,23(1):1–10.
- [7] 郭旭升, 胡东风, 魏志红, 等. 涪陵页岩气田的发现与勘探认识[J]. 中国石油勘探, 2016,21(3):24–37.
- Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wei Zhihong, *et al.* Discovery and exploration knowledge of Fuling shale gas field[J]. China Petroleum Exploration, 2016,21(3):24–37.
- [8] 董大忠, 邹才能, 戴金星, 等. 中国页岩气发展战略对策建议[J]. 天然气地球科学, 2016,27(3):397–406.
- Dong Dazhong, Zou Caineng, Dai Jinxing, *et al.* Suggestions on China's shale gas development strategy[J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(3):397–406.
- [9] 杨玉茹, 孟凡洋, 白名岗, 等. 世界最古老页岩气层储层特征与勘探前景分析[J]. 中国地质, 2020,47(1):14–28.
- Yang Yuru, Meng Fanyang, Bai Minggang, *et al.* Analysis of reservoir characteristics and exploration prospects of the oldest shale gas layer in the world[J]. Geology in China, 2020,47(1): 14–28.
- [10] 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 and development prospect of shale gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):31–44.
- [11] 张金川, 陶佳, 李振, 等. 中国深层页岩气资源前景和勘探潜力[J]. 天然气工业, 2021,41(1):15–28.
- Zhang Jinchuan, Tao Jia, Li Zhen, *et al.* Resource prospect and exploration potential of deep shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2021,41(1):15–28.
- [12] 包书景, 林拓, 聂海宽, 等. 海陆过渡相页岩气成藏特征初探: 以湘中坳陷二叠系为例[J]. 地学前缘, 2016,23(1):44–53.
- Bao Shujing, Lin Tuo, Nie Haikuan, *et al.* Preliminary study on the characteristics of shale gas accumulation in the transitional facies between sea and land: a case study of the Permian in the Central Hunan Depression[J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(1):44–53.
- [13] 尹赞勋, 徐道一, 浦庆余. 中国地壳运动名称资料汇编[J]. 地质论评, 1965,23(1):20–81.
- Yin Zanzun, Xu Daoyi, Pu Qingyu. Compilation of names of crustal movements in China[J]. Geological Review, 1965, 23(1):20–81.
- [14] 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 events of the Soochow Movement and the boundary of the Permian system[J]. Journal of Stratigraphy, 1994,18(4):309–315.
- [15] 沈树忠, 戎嘉余. 中国地层学新进展: “中国综合地层和时间框架” 专辑前言[J]. 中国科学: 地球科学, 2019,49(1):1–6.
- Shen Shuzhong, Rong Jiayu. New progress in stratigraphy in China: preface to the album “Comprehensive Stratigraphy and Time Frame in China” [J]. Scientia Sinica Terrae, 2019, 49(1):1–6.
- [16] 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 2011,46(3):589–606.
- He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, *et al.* Formation and evolution of multi-cycle superimposed basins in Sichuan[J]. Chinese Journal of Geology, 2011,46(3):589–606.
- [17] 刘树根, 孙玮, 钟勇, 等. 四川海相克拉通盆地显生宙演化阶段及其特征[J]. 岩石学报, 2017,33(4):1058–1072.
- Liu Shugen, Sun Wei, Zhong Yong, *et al.* Phanerozoic evolution stages and characteristics of the Sichuan marine craton basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017,33(4):1058–1072.
- [18] 黄涵宇, 何登发, 李英强, 等. 四川盆地及邻区二叠纪梁山—栖霞组沉积盆地原型及其演化[J]. 岩石学报, 2017,33(4):1317–1337.
- Huang Hanyu, He Dengfa, Li Yingqiang, *et al.* The prototype and evolution of the Permian Liangshan–Qixia Formation sedimentary basin in the Sichuan Basin and adjacent areas[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017,33(4):1317–1337.
- [19] 梁新权, 周云, 蒋英, 等. 二叠纪东吴运动的沉积响应差异: 来自扬子和华夏板块吴家坪组或龙潭组碎屑锆石 LA-ICPMS U–Pb 年龄研究[J]. 岩石学报, 2013,29(10):3592–3606.
- Liang Xinquan, Zhou Yun, Jiang Ying, *et al.* Differences in sedimentary responses to the Soochow Movement in the Permian: a study of detrital zircon LA-ICPMS U–Pb ages from the Wujiaping Formation or Longtan Formation of the Yangtze and Cathaysia Plates[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(10):3592–3606.
- [20] 刘光祥, 金之钧, 邓模, 等. 川东地区上二叠统龙潭组页岩气勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2015,36(3):481–487.
- Liu Guangxiang, Jin Zhijun, Deng Mo, *et al.* The exploration potential of shale gas in the Upper Permian Longtan Formation in eastern Sichuan[J]. Oil & Gas Geology, 2015,36(3):481–487.
- [21] 何治亮, 聂海宽, 李双建, 等. 特提斯域板块构造约束下上扬子地区二叠系龙潭组页岩气的差异性赋存[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1):1–15.
- He Zhiliang, Nie Haikuan, Li Shuangjian, *et al.* Differential occurrence of shale gas in the Permian Longtan Formation in the Upper Yangtze region under the constraints of plate tectonics in the Tethys region[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1):1–15.

- [22] 梁西文, 李乐. 鄂西渝东区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 in Yudong district, Western Hubei[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021,43(3):386-394.
- [23] 孟庆峰, 侯贵廷. 页岩气成藏地质条件及中国上扬子区页岩气潜力[J]. 油气地质与采收率, 2012,19(1):11-14.
Meng Qingfeng, Hou Guiting. Geological conditions of shale gas accumulation and shale gas potential in the Upper Yangtze region of China [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(1):11-14.
- [24] 王宗秀, 李春麟, 李会军, 等. 川东—武陵地区构造格局及其演化[J]. 地质力学学报, 2019,25(5):827-839.
Wang Zongxiu, Li Chunlin, Li Huijun, *et al.* The tectonic pattern and its evolution in the eastern Sichuan—Wuling area[J]. Journal of Geomechanics, 2019,25(5):827-839.
- [25] 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.* Several new developments in the study of marine hydrocarbon generation and accumulation in southern China (1): distribution of four sets of regional marine source rocks in southern China[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(2):1-16.
- [26] 彭女佳, 何生, 郝芳, 等. 川东南彭水地区五峰组—龙马溪组页岩孔隙结构及差异性 [J]. 地球科学, 2017,42(7):1134-1146.
Peng Nvjia, He Sheng, Hao Fang, *et al.* Pore structure and difference of Wufeng—Longmaxi shale in Pengshui area, southeastern Sichuan[J]. Earth Science, 2017,42(7):1134-1146.
- [27] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020,25(1):45-56.
Li Yang, Xue Zhaojie, Cheng Zhe, *et al.* Progress and development direction of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1):45-56.
- [28] 冯增昭, 鲍志东. 滇黔桂地区中下三叠统油气储集岩研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 1994,1(4):199-200.
Feng Zengzhao, Bao Zhidong. Study on Middle—Lower Triassic oil and gas reservoir rocks in Yunnan—Guizhou—Guangxi area[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1994,1(4):199-200.
- [29] 陈尚斌, 秦勇, 王阳, 等. 中上扬子区海相页岩气储层孔隙结构非均质性特征 [J]. 天然气地球科学, 2015,26(8):1455-1463.
Chen Shangbin, Qin Yong, Wang Yang, *et al.* Pore structure heterogeneity of marine shale gas reservoirs in the middle and upper Yangtze region[J]. Natural Gas Geoscience, 2015,26(8):1455-1463.
- [30] 何治亮, 聂海宽, 胡东风, 等. 深层页岩气有效开发中的地质问题 [J]. 石油学报, 2020,41(4):379-391.
He Zhiliang, Nie Haikuan, Hu Dongfeng, *et al.* Geological problems in effective development of deep shale gas[J]. Acta Petroli Sinica, 2020,41(4):379-391.
- [31] Pollastro R M, Jarvie D M, Hill R J, *et al.* Geologic framework of the Mississippian Barnett shale, Barnett—paleozoic total petroleum system, Bend Arch—Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007,91(4):405-436.
- [32] Pollastro R M. Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007,91(4):551-578.
- [33] 蒋裕强, 董大忠, 漆麟, 等. 页岩气储层的基本特征及其评价 [J]. 天然气工业, 2010,30(10):7-12.
Jiang Yuqiang, Dong Dazhong, Qi Lin, *et al.* Basic characteristics and evaluation of shale gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(10):7-12.
- [34] 蒋裕强, 宋益滔, 漆麟, 等. 中国海相页岩岩相精细划分及测井预测: 以四川盆地南部威远地区龙马溪组为例 [J]. 地学前缘, 2016,23(1):107-118.
Jiang Yuqiang, Song Yitao, Qi Lin, *et al.* Fine lithofacies division and logging prediction of marine shale in China: a case study of the Longmaxi Formation in Weiyuan area, southern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016,23(1):107-118.
- [35] 刁海燕. 泥页岩储层岩石力学特性及脆性评价 [J]. 岩石学报, 2013, 29(9):3300-3306.
Diao Haiyan. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale reservoirs[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9):3300-3306.