

引用格式: 刘忠宝. 四川盆地自流井组页岩油气地质特征及富集规律[J]. 世界石油工业, 2024, 31(3): 35-47.

LIU Z B. Geological characteristics and enrichment regular patterns of shale oil and gas at Ziliujing Formation in Sichuan Basin[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(3): 35-47.

四川盆地自流井组页岩油气地质特征及富集规律

刘忠宝^{1, 2, 3}

(1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化页岩油气勘探开发
重点实验室, 北京 102206; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘要: 为研究中高成熟陆相页岩油气形成条件及富集规律, 以四川盆地自流井组东岳庙段与大安寨段两套富有机质页岩为研究对象, 采用岩石薄片、全岩X衍射、有机碳含量、岩石热解、干酪根碳同位素、氩离子抛光-扫描电镜、物性等多种实验测试技术方法, 基于岩相、烃源、储集、保存及含油气性等研究, 总结了中高成熟陆相页岩油气富集规律。研究结果表明: 研究区陆相富有机质页岩岩相及组合类型多样, 以富含方解石介壳纹层为特点; 页岩物性明显好于介壳灰岩与粉砂岩夹层, 其中以黏土质页岩与介壳灰质页岩宏观物性与微观孔隙(类型、结构)最佳; 整体保存条件好, 具有构造稳定、高压-超高压特征, 油气同产。综合分析认为自流井组陆相富有机质页岩具有“两相控烃控储、压缝控富控产”的页岩油气富集规律。基于目前盆地重点探区及相邻层段的勘探实践, 提出加强重点地区地质-开发-工程一体化技术攻关, 加强非常规页岩油气-常规油气整体综合评价研究与勘探部署。

关键词: 陆相页岩油气; 有机显微组分; 页岩储层; 有机质孔隙; 保存条件; 自流井组

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-0030(2024)03-0035-013 **DOI:** 10.20114/j.issn.1006-0030.20240104001

Geological characteristics and enrichment regular patterns of shale oil and gas at Ziliujing Formation in Sichuan Basin

LIU Zhongbao^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Beijing 102206, China;
2. Sinopec Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production Technology, Beijing 102206, China;
3. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to find out the formation conditions and enrichment rules of medium or high mature continental shale oil and gas. Taking the two sets of organic-rich shale that rest on Dongyuemiao member and Daanzhai member of Ziliujing Formation in Sichuan Basin as the research object, using variety of experimental testing methods, such as rock thin section, whole-rock X-ray diffraction, organic carbon content, rock pyrolysis, kerogen carbon isotope, SEM image observation, physical properties, etc. The enrichment rules of medium or high mature continental shale oil and gas are summarized, which based on the research of lithofacies, hydrocarbon source, reservoir, preservation and oil and gas bearing properties. The result shows that the lithofacies and combination of continental organic-rich shale in the study area are various, characterized by calcite-rich shell laminae; the physical properties of shale are obviously better than the shell shale with interlaminated siltstone, among the macroscopic physical properties and microscopic pores (types and structures) of clay shale and shell limestone shale are best; the whole observation conditions are good, having the characteristics of stable structure and high pressure-ultra-high pressure, and simultaneous oil and gas production. Comprehensive analysis shows that continental organic-rich shale has the enrichment rules of “lithofacies and organic-facies control the hydrocarbon source and reservoir, pressure and micro-fracture control enrichment and production of shale oil”. Based on current exploration practices in key area and adjacent strata in Sichuan Basin, proposing highlight advice: firstly, strengthening the unifying technology of geology-development-engineering in key areas; secondly, strengthening comprehensive evaluation research and exploration deployment of unconventional shale oil and gas - conventional oil and gas.

Keywords: continental shale oil and gas; organic maceral; shale reservoir; organic matter pore; storage condition; Ziliujing Formation

收稿日期: 2024-01-04

修回日期: 2024-05-11

基金项目: 国家科技重大专项课题“陆相层系页岩气勘探潜力评价”(2017ZX05036004); 中国石油化工股份有限公司基础前瞻性研究课题“混积型和基岩型陆相页岩油优质储层发育机理”(P23240-3)

作者简介: 刘忠宝(1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事非常规油气地质、碳酸盐岩沉积储层研究工作。

E-mail: liuzb.syky@sinopec.com

0 引言

中国陆相泥页岩层系分布广泛,陆相生油气理论是中国油气地质的重要特色,处于国际领先行列,目前的勘探已由常规油气“近源找油”转变到非常规页岩油气“进源找油”^[1]。近几年,随着松辽盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地及四川盆地等陆相页岩油气勘探实践及地质研究的不断深入,逐渐认识到陆相页岩油气形成地质条件的复杂性^[2],中国陆相湖盆沉积在构造、气候、物源、水动力条件、水介质性质、生物活动等多种因素控制下,具有纵向上富有机质页岩与夹层频繁互层,夹层类型多样^[3],粉-细砂岩类、碳酸盐岩类(灰岩、白云岩)、凝灰岩等均有,夹层类型可以是其中一种或者多种,横向上岩相变化快的特点;不同盆地及页岩层系中油气储集层“甜点”有夹层型、混积型和页岩型3类,鄂尔多斯盆地长7段为砂岩夹层型“甜点”,渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为白云质混积型“甜点”,松辽盆地青山口组页岩型“甜点”^[4]。对于多个盆地页岩油气形成各类地质参数的对比也反映出中国陆相沉积盆地的每一套泥页岩层系都各具特色,已有的认识表明,与其他各大盆地相比,四川盆地侏罗系页岩层系具独特性,纵向上发育3套富有机质页岩层系,页岩黏土矿物含量普遍较高,且页岩中富含生物介壳灰岩、粉砂岩等夹层。诸多技术难点问题急需攻关研究:①分析有利岩相组合类型;②判断对油气储集与赋存有利的页岩还是夹层;③有机质成熟度主体在1.1%~1.8%,明显较其他多数盆地陆相层系高,有利于有机质孔隙发育,川中、川北、川东等地区钻井试采多表现为油气同产特征,亟待认识页岩中有机质孔隙发育特点;④平面上不同地区、纵向上不同层段页岩油气宏观富集条件的差异,如何有针对性、有序地勘探部署。

本文以川北元坝与阆中、川东复兴、川东北普光等地区为重点,从岩心观察描述入手,基于岩矿、有机地球化学、储层、含气性等4大类20多种实验测试手段,分析了四川盆地自流井组页岩油气富集特征,明确了页岩油气富集规律,提出了勘探与研究建议。对深入认识中国陆相页岩油气地质特点,促进地质评价技术进步及实际勘探部署具有重要意义。

1 页岩油气勘探概况

四川盆地侏罗系页岩油气主要发育于下侏罗统自流井组东岳庙段和大安寨段、中侏罗统凉高山组(千佛崖组)凉二段(见图1),东岳庙段以黑色泥页岩为主,夹少量砂岩和介壳灰岩;大安寨段是侏罗系最为重要的烃源岩发育层段,黑色泥页岩夹介壳灰岩为主;凉二段以厚层泥页岩夹砂岩沉积为主,有机质含量高,生油潜力大^[5]。

中国石化四川盆地侏罗系页岩油气勘探可分为3个阶段:①页岩油气发现与勘探评价阶段(2008—2012年)。对元坝、涪陵北部(现称为复兴)、建南3个地区页岩气开展老井复试^[6],首先在元坝YB9井千佛崖组测试获日产油16.6 m³,气1.2×10⁴ m³,2011年在建南钻探中国石化第1口页岩气水平井JYHF-1井,在东岳庙段获日产气1.23×10⁴ m³,累计实施老井直井压裂与水平井钻探及压裂测试20多口,多口井获得中高产工业油气流;②页岩油气勘探潜力再评价阶段(2013—2018年)。对复兴、元坝及阆中等重点区块开展页岩油气形成地质条件系统研究,优选页岩油气勘探有利目标区,论证并部署专探井;③页岩油气勘探突破与技术攻关阶段(2018年至今)。2018年在复兴地区部署钻探第1口东岳庙段页岩气专探井FY10井,2020年FY10井放喷测试,获日产气5.58×10⁴ m³、日产油17.6 m³,取得复兴地区东岳庙段陆相页岩气勘探重大突破^[7];2019年在川东复兴地区凉高山组部署页岩油气探井TY1井,2021年水平井分段压裂测试,获日产气7.5×10⁴ m³、日产油9.8 m³,实现凉高山组页岩油气勘探重大突破^[6],迄今为止,复兴地区已先后实施多口陆相页岩油气专探井及开发试验井组,积极开展勘探开发产能建设。2020年,在川北元坝地区千佛崖组部署YY3井,2021年水平井测试获日产气1.8×10⁴ m³,日产油15.6 m³,实现元坝地区页岩油气勘探突破^[8]。2022年,川东北普光地区PLY1井千佛崖组试气获日产气10.4×10⁴ m³,实现普光地区页岩气勘探突破。

自1958年以来,中国石油在四川盆地侏罗系大安寨段常规构造-裂缝油气藏、大安寨段致密灰岩与沙溪庙组砂岩致密油藏等勘探领域取得较好的进展,发现了多个油田^[1]。2019年,邹才能等提出侏罗系油和气发展,应尽快向孔隙型页岩油气转变,即“进源找油”,立足于在大安寨段页岩层系

中寻找大型页岩油气田。在川中龙岗地区LQ2井大安寨二亚段7 m段采用射孔加砂方式,测试日产气2 659 m³;C68井大二亚段黑色页岩和介壳灰岩中发生油气侵,并溢出原油15 L。壳牌公司在川中秋林构造钻探的QL19井直井压裂获日产油2.3~4.1 t

和日产气1 500 m³[1]。2019年在川中射洪县开钻首口页岩油气井NC 2井,正式启动侏罗系页岩油气勘探开发[9]。2020年,在仪陇—平昌区块凉高山组部署风险探井PA1井。2021年测试获日产油112.8 m³、日产气11.45×10⁴ m³[10]。

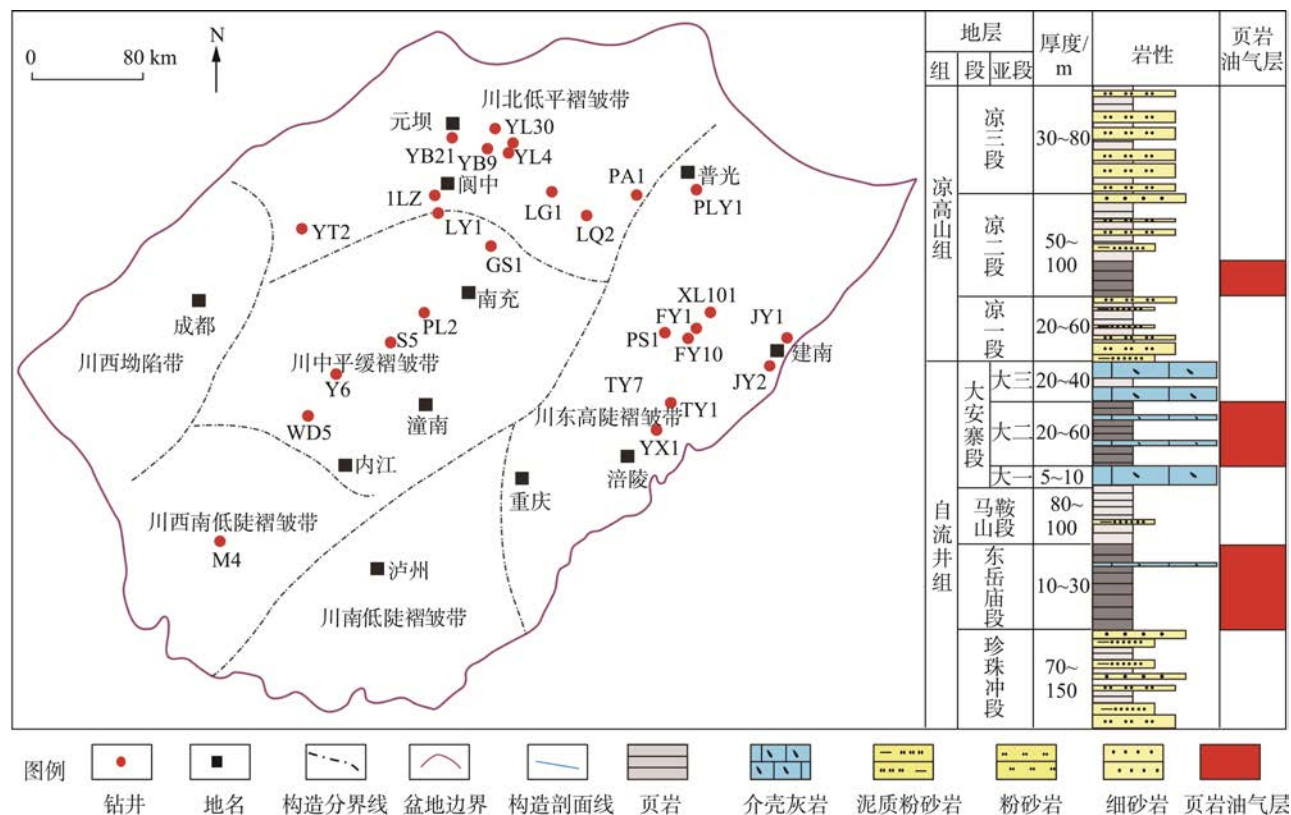


图1 四川盆地构造单元划分及侏罗系地层柱状图

Fig.1 Division of structural units in Sichuan Basin and Jurassic stratigraphic histogram

2 页岩油气富集特征

2.1 页岩与不同尺度夹层频繁互层, 岩相及组合类型多样

四川盆地19口钻井岩心观察描述、页岩全岩矿物X衍射分析及岩石薄片鉴定综合分析表明,自流井组页岩层段岩相及组合类型复杂[11],页岩类包括黏土质页岩、纹层状粉砂质页岩、纹层状介壳页岩、介壳灰质粉砂质页岩(见图2);夹层包括灰岩和砂岩2大类,灰岩主要有介壳灰岩、泥质介壳灰岩、粉晶灰岩等,砂岩主要有粉砂岩、泥质粉砂岩、细砂岩、泥质细砂岩等。岩相组合主要有4大类:页岩型、页岩夹介壳灰岩型、页岩夹粉细砂岩型、页岩夹介壳灰岩夹粉砂岩型。整体而言,页岩层系岩相及组合类型受不同沉积时期陆源碎屑供给、相对湖平面升降、湖盆

位置及水体矿化度等多种因素影响。下侏罗统自流井组东岳庙段半深湖相富有机质岩相组合主要为页岩型、页岩夹介壳灰岩型;大安寨段半深湖相富有机质岩相组合主要为页岩型、页岩夹介壳灰岩型、页岩夹介壳灰岩夹粉砂岩型(见图3);中侏罗统凉高山组(千佛崖组)富有机质岩相组合主要为页岩型(夹粉砂质纹层)、页岩夹粉-细砂岩型。不同层段钻井岩心精细观察描述显示,在录井剖面尺度上表现为连续沉积的页岩型组合,岩心观察尺度上可见大量毫米级到厘米级夹层发育,如川北元坝YL4井大安寨段3 710~3 800 m,录井剖面中发育较多的米级介壳灰岩及少量粉砂岩夹层,发育页岩型、页岩夹介壳灰岩型、页岩夹灰夹砂型3种组合,而3 783~3 791.5 m、3 753~3 761 m两段页岩型组合中分别可见22条、36条介壳毫米级纹层到厘米级薄层(见图3)。

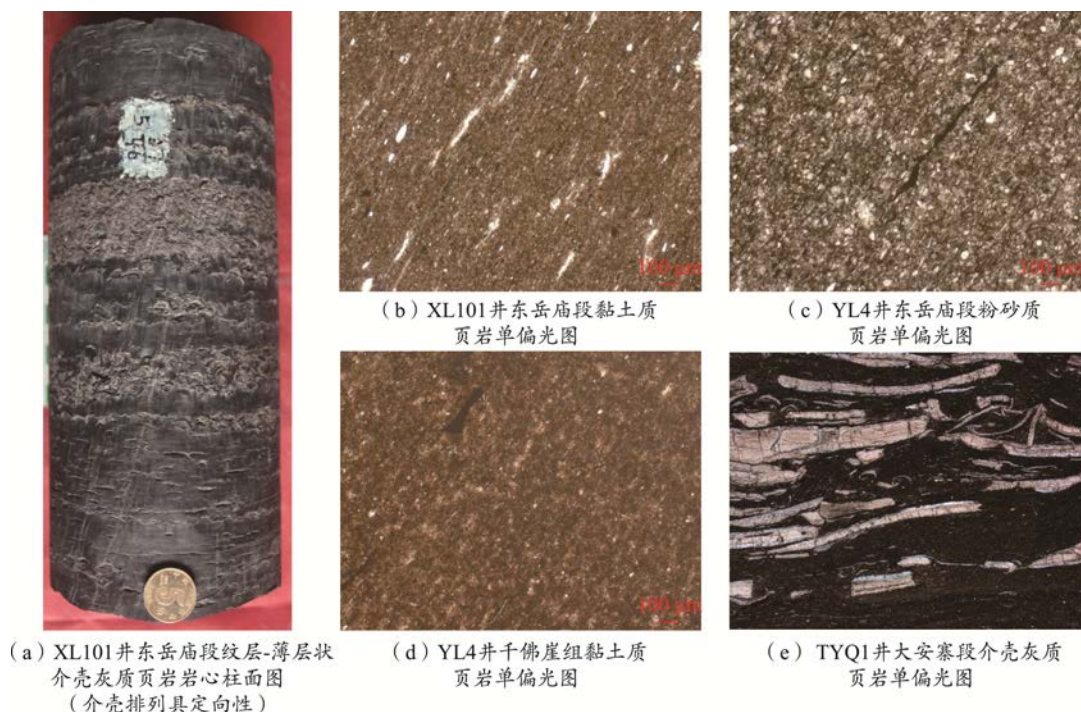


图2 四川盆地侏罗系典型页岩岩心与薄片镜下特征

Fig.2 Microscopic characteristics of typical Jurassic shale cores and thin sections in Sichuan Basin

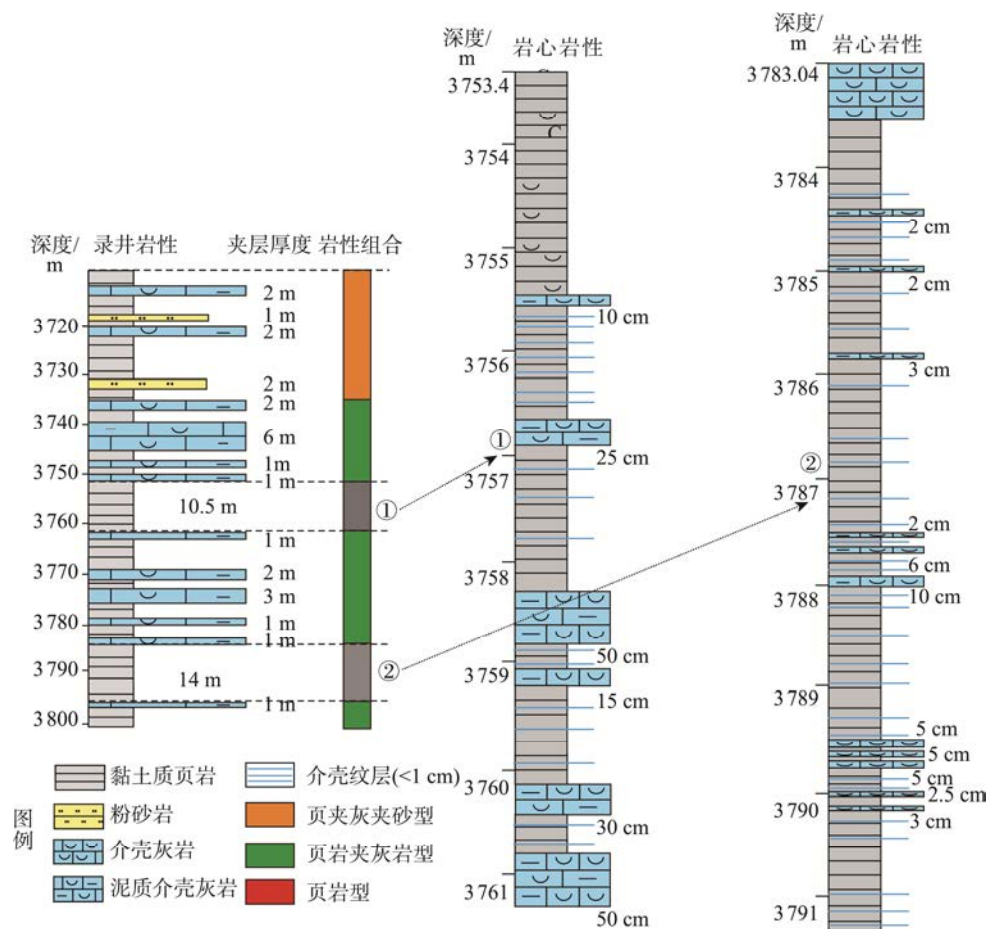


图3 YL4井自流井组大安寨段大二亚段不同尺度下岩相组合特征

Fig.3 Characteristics of lithofacies combinations at different scales in the Second Subsegment of the Daanzhai Formation of the Well YL4 Ziliujing Formation

2.2 页岩有机质丰度较高、成熟度较高，混合型干酪根为主，生油气潜力好

受侏罗纪不同时期沉积相带控制，不同地区富有机质页岩发育层段有所差异。川中地区富有机质页岩主要发育于大安寨段，页岩厚度大于30 m，如莲池—龙岗地区，达到成熟-高成熟阶段：TOC（总有机碳含量）介于0.5%~5.57%，平均值为1.28%其中TOC>1%的样品占57.93%； R_o 介于0.8%~1.5%，平均值为1.07%^[12]。川东地区东岳庙段富有机质页岩广泛分布，页岩TOC相对较高，如复兴地区东岳庙段页岩厚度22~30 m，处于高成熟演化阶段：TOC（FY10井，N=63）介于0.47%~4.04%，平均值为1.51%； R_o 介于1.52%~1.58%，平均值为1.56%。而川东利川地区东岳庙段页岩TOC（MY1井，N=17）介于0.35%~1.93%，平均值达1.22%； R_o 介于1.28%~1.44%，平均值为1.33%。川北地区富有机质页岩主要发育于大安寨段：如元坝地区页岩TOC（YY2井，N=58）介于0.52%~3.28%，平均值为1.18%； T_{max} 介于467~512℃，平均值为493℃。川东北达州地区发育大安寨段富有机质页岩：TOC（TY1井，N=18）介于0.57%~2.41%，平均值为1.22%； R_o 介于0.76%~1.08%，平均值为0.96%。

从岩石热解参数来看，不同地区生烃潜量（PG）、游离烃（ S_1 ）、干酪根烃量（ S_2 ）参数存在一定的差异。生烃潜量介于0.26~10.77 mg/g，范围较大。从TOC与 S_1 关系（见图4）来看，整体上表现为随着TOC增大， S_1 增大的正相关关系，但 S_1 值差异较为明显，川中地区大安寨段页岩 S_1 （N=400）主体值介于0~4.00 mg/g，平均值为1.06 mg/g^[12]， S_1 在1~4 mg/g之间仍存在大量的数据点，明显高于川东东岳庙段、川北大安寨段等地区（ S_1 多小于1 mg/g），除其TOC略高于其他地区及层段外，还应与其 R_o 值相对较低有关，揭示出川中地区大安寨段页岩油勘探潜力明显优于其他地区，其次为川东复兴地区东岳庙段，FY10HF井已获工业页岩油气重大突破，其水平井穿行的东一亚段④小层生烃潜量最大值可达5.76 mg/g，平均值为2.59 mg/g。

稳定碳同位素受热演化作用影响较小，能够较好地反映有机质的来源。川东复兴与利川、川北元坝、川东北达州等8口钻井自流井组92个样品干酪根碳同位素数据分析结果显示，东岳庙段与大安寨段页岩腐泥混合型（II₁）、腐殖混合型（II₂）及腐殖型

（III）均有发育，有机质类型以II₁、II₂型为主（见图5）。从不同地区及层段统计对比来看，川东复兴与利川东岳庙段、川东北达州大安寨段均以II₁、II₂为主，而川北元坝大安寨段以II₂、III型为主。整体而言，自流井组东岳庙段与大安寨段页岩具有有机质类型多样，以II₁、II₂型为主的特点，具有较好的生油气能力。

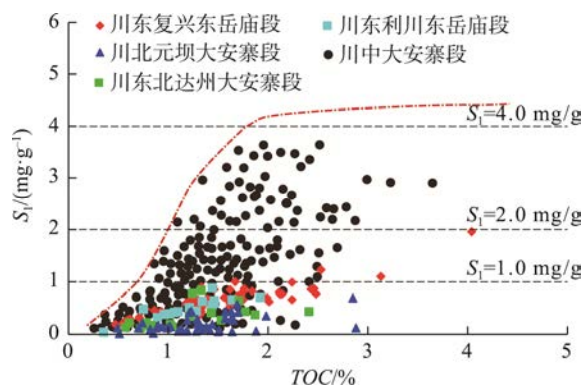


图4 四川盆地侏罗系自流井组页岩 TOC与 S_1 关系图

Fig.4 Relation between TOC and S_1 of Jurassic Ziliujing Formation shale in Sichuan Basin

数据来源：参考文献[12]

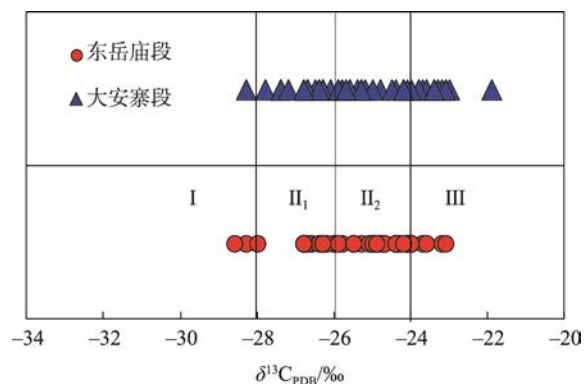


图5 四川盆地自流井组页岩干酪根碳同位素与有机质类型特征

Fig.5 Kerogen carbon isotope and organic type characteristics of Ziliujing Formation shale in Sichuan Basin

2.3 页岩物性好于夹层，黏土质页岩与介壳灰质页岩储集性能好于粉砂质页岩

2.3.1 页岩与夹层物性特征

四川盆地10口钻井岩心物性数据（N=512）统计分析结果表明（见图6），页岩孔隙度介于1.01%~8.42%（N=419），平均值为3.73%，渗透率（N=346）平均值为 $0.314 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；粉（细）砂岩孔隙度介于0.92%~3.61%（N=31），平均值为

1.92%，渗透率（ $N=23$ ）平均值为 $0.0322 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；介壳灰岩孔隙度介于0.40%~4.31%（ $N=62$ ），平均值为1.85%，渗透率（ $N=47$ ）平均值为 $0.0173 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；整体上页岩物性明显好于粉（细）砂岩与介壳灰岩夹层，其中以黏土质页岩、介壳灰质页岩孔渗性能最好，平均孔隙度可达4.5%。

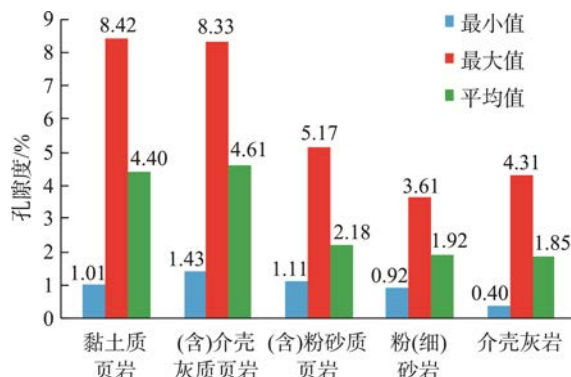


图6 四川盆地侏罗系页岩与夹层物性特征
Fig.6 Physical properties of Jurassic shale and interlayer in Sichuan Basin

2.3.2 不同页岩岩相孔隙特征

四川盆地侏罗系富有机质页岩中无机质孔隙、有机质孔隙及微裂缝3大类储层均有发育，且主要以无机质孔隙为主，其次为有机质孔隙，局部发育微裂缝^[13]。本次基于大量氦离子抛光-扫描电镜鉴定分析，重点对黏土质页岩、纹层状介壳灰质页岩及粉砂质页岩3种页岩岩相孔隙发育特征分析如下。

（1）黏土质页岩。该页岩以相对高有机碳含量、高黏土矿物含量（>50%）为特征，黏土矿物含量最高可达65%，其次为石英，含量主体值介于20%~30%，在川东东岳庙段、川中与川北大安寨段、川东北千佛崖组及川东凉高山组均有发育。扫描电镜下可见大量无机孔，主要为片状黏土矿物层间孔（见图7a），其形态类型主要与黏土矿物及其颗粒之间的排列方式有关，当黏土矿物晶片之间定向排列相对较好时，抗压实能力相对弱，主要形成狭缝形孔隙，长度大小不一，延伸方向多与黏土矿物晶片长轴方向一致，宽主要以纳米级为主，当黏土矿物之间杂乱堆积或黏土矿物与石英等刚性颗粒接触时，形成的孔隙多为三角形、不规则形（见图7b）；绝大多数样品中可见个体相对较大的无孔暗色有机质（见图7c），且部分黏土矿物层间孔中可见暗色有机质充填（油

后沥青），内部普遍不同程度的发育有机质孔隙（见图7d）；个别样品中还可可见少量有机质内发育具原始生物形态的结构孔（见图7e），黏土质页岩岩心浸水可见大量页理缝发育，缝宽1 mm左右，扫描电镜下普遍可见微米级齿状微裂缝。

（2）纹层状介壳灰质页岩。该页岩与黏土质页岩相比，以富含方解石介壳纹层或薄层为特征，主要发育在川东东岳庙段、川中与川北大安寨段。扫描电镜下除了可见较多的片状黏土矿物层间孔外，还可可见方解石介壳内溶蚀孔，如川东复兴FY10井东岳庙段与川北元坝YY2井大安寨段介壳灰质页岩中均有介壳内溶蚀孔发育（见图7f），介壳内溶蚀孔大小不一，形态呈多边形、不规则形及针孔状，且部分较大的溶蚀孔内可见暗色有机质充填，进一步放大观察尺度有机质中仍可见孔隙发育，反映出早期原油生成后运移储集在介壳内溶蚀孔中，后期随着成熟度提高裂解生气成孔的过程，揭示出页岩中介壳内溶蚀孔对于油气富集具有一定的贡献；扫描电镜下有机质及有机质孔隙的发育情况与黏土质页岩类似，大个体无孔有形态有机质与有孔无固定形态固体沥青有机质共存（见图7g）；除页岩发育一些页理缝外，介壳纹层与页岩之间可发育一些微裂缝。

（3）粉砂质页岩。该页岩以富含陆源碎屑石英颗粒、富黏土矿物为特征，呈纹层状、颗粒支撑结构为主，主要发育在川北东岳庙段、川东大安寨段局部层段、川东北千佛崖组及川东凉高山组。岩心观察可见页岩中发育大量粉砂质纹层，扫描电镜下碎屑石英多呈颗粒支撑结构（见图7i、图7j）。从储层孔隙发育来看，除发育黏土矿物层间孔外，局部可见少量残余粒间孔，从有机质孔隙的发育情况来看，整体不如黏土质页岩、介壳灰质页岩，川北元坝东岳庙段粉砂质页岩（Ⅲ型干酪根）扫描电镜下基本不发育有机质孔隙，而元坝千佛崖组与复兴凉高山组纹层状粉砂质页岩（Ⅱ型干酪根）中可见有机质孔隙发育。这主要与页岩有机质类型及有机显微组分差异有关。

2.4 保存条件好，具高压-超高压特征，油气同产

2.4.1 构造特征与保存条件

四川盆地中生代以来，经历了印支运动、燕山运动及喜马拉雅运动3期构造活动的影响，中晚侏罗世时期（燕山早幕）是大陆多向汇聚构造体系的

形成和发展的主要时期,秦岭造山带的再生活活动形成川北米仓山—大巴山前陆构造带^[14];太平洋板块向西推挤形成了川东地区NW向突出的弧型构造和川南华蓥山帚状构造;多向挤压事件强烈改造了四川T₃—J₁₋₂原形盆地,周缘褶皱构造带基本定型,尽管早白垩世晚期(燕山晚幕)挤压事件对四川盆地有进一步改造,使得NW—SE向构造得到加强^[15],但侏罗系地层整体仍具有相对保存比较完整、分布稳定、面积广的特点。具体到不同地区及构造带总体呈现出:川中地区构造相对稳定,地层平缓,尤其中下侏罗统地层保存好,且基本不发育断裂,地层压力系数多大于1.2,大安寨段压力系数为1.46~1.63,上侏罗统沙溪庙组压力系数为1.23~1.72,均为异常高压,构造剖面解释与地层压力均反映出川中地区侏罗

系具有较好保存条件, LG9井等(大安寨段获日产油76.5 m³)一批工业油流井钻探成功也证实了这一点^[16];川北地区主要为低平褶皱带,元坝地区地震剖面解释,除局部地区断裂较发育,整体构造相对平缓,多数钻井大安寨段页岩层内压力系数大于1.2,高压特征明显,保存条件较好;而川东地区主要发育北东、北北东向褶皱带,断裂较发育^[16],高部位由于剥蚀作用,侏罗系地层被剥蚀殆尽,三叠系出露地表,低部位残存中下侏罗统地层,呈现背斜与向斜相间发育特征,在向斜区,尤其是宽缓向斜区具有较好保存条件,如拔山寺向斜TY1井凉高山组、FY10井东岳庙段(压力系数1.75),均已获页岩油气流突破,展示了川东地区良好的页岩油气勘探开发潜力。

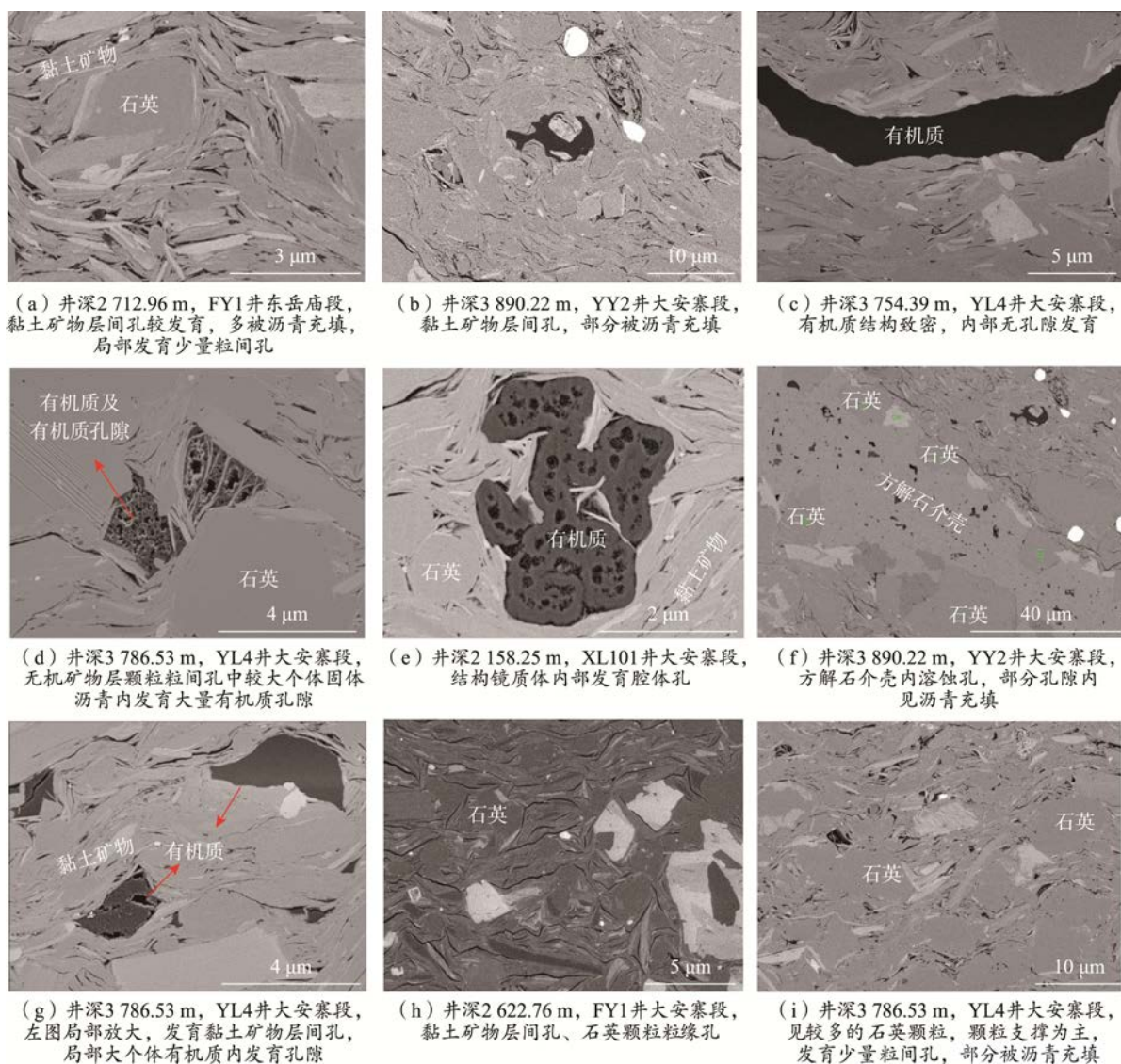


图7 四川盆地侏罗系富有机质页岩储层主要孔隙类型及特征

Fig.7 Main pore types and characteristics of Jurassic organic-rich shale reservoirs in Sichuan Basin

2.4.2 页岩层系含油气性特征

早期对四川盆地侏罗系的油气勘探，主要集中在沙溪庙组砂岩、自流井组大安寨段灰岩常规层系，有一大批钻井获得工业油气流，如川中地区在大安寨段介壳灰岩，至少有130余口单井累计产油超过 $1\times 10^4\text{t}$ ^[17]。随着油气勘探的不断的深入，富有机质页岩层段的非常规油气勘探已逐渐成为侏罗系勘探部署的重点领

域。2011年至今，中国石化、中国石油多家油气分公司积极探索，在侏罗系东岳庙段、大安寨段、凉高山组（千佛崖组）3套富有机质页岩层段中均有不同程度的页岩油气流发现（见表1）。尽管整体产量不高，但部分新钻井仍获得相对好的测试效果，如FY10井、TY1井、PA1井、YY3井及PLY1井，对推进不同地区的页岩油气勘探进程起到了重要作用。

表1 四川盆地自流井组页岩层段油气测试成果统计数据表
Tab.1 Statistical data of oil and gas testing results of Ziliujing Formation shale strata in Sichuan Basin

地区及层段	井号	层位	岩性	压力系数	油气测试成果		备注
					日产油/ m^3	日产气/ 10^4m^3	
川东东岳庙段	FYHF 10	J _{1d}	页岩	1.75	17.6	5.58	舒志国等(2021) ^[17]
	XYHF 1	J _{1d}	页岩	/	1.56	1.44	
	XYHF 2	J _{1d}	页岩	/	18	2.2	
	S12	J _{1d}	页岩	/	/	0.2	李世临等(2021) ^[18]
	X4	J _{1d}	页岩	/	16	/	
	YA18	J _{1d}	砂岩	/	1.03	0.54	王世谦等(2012) ^[19]
	ZQ1	J _{1d}	石灰岩、砂岩	/	/	5.85	
	JYHF1	J _{1d}	页岩	/	/	1.23	王登等(2020) ^[20]
川东大安寨段	FYHF1	J _{1dn}	页岩	/	/	1.78	孙莎莎等(2021) ^[9]
	XL101	J _{1dn}	灰岩	/	54	11	王世谦等(2012) ^[19]
	FS1	J _{1dn}	灰岩	/	68	12.66	
	BX1	J _{1dn}	灰岩	/	少量	2.77	
	YB21	J _{1dn}	页夹砂	1.61	/	50.7	郭旭升等(2021) ^[8]
	YB101	J _{1dn}	页岩、灰岩	1.9	/	13.97	
川北大安寨段	YB11	J _{1dn}	页岩	1.97	/	14.44	
	YB102	J _{1dn}	砂岩、灰岩	1.33	/	8.48	孙莎莎等(2021) ^[9]
	YY2	J _{1dn}	页岩、灰岩	1.8	/	0.42	
川中大安寨段	LQ2	J _{1dn}	页岩	/	/	0.2659	孙莎莎等(2021) ^[9]
	QL19	J _{1dn}	页岩	/	2.3-4.1	0.15	

3 提出“两相控烃控储、压缝控富控产”的陆相页岩油气富集规律

通过对川东复兴与建南东岳庙段、川北元坝大安寨段等地区典型页岩油气井综合解剖，结合岩相、烃源、构造保存及含油气性等研究成果，提出四川盆地自流井组高成熟度陆相页岩具有“两相控烃控储、压缝控富控产”的页岩油气富集规律：半深湖优质页岩岩相是页岩油气富集的物质基础；有机质类型与成熟度控烃-控储是页岩油气富

集的关键因素；良好保存条件（构造稳定与地层高压-超压）是页岩油气富集高产的重要保障；微裂缝发育有利于页岩油气高产。

3.1 岩相对烃源与储集宏观参数的控制作用

自流井组东岳庙段与大安寨段页岩层段主要发育于浅湖-半深湖沉积环境，页岩中砂质来源于盆地周缘三角洲前缘，而介壳方解石来源于湖盆内部浅水生物介壳滩，是风暴作用冲刷搬运后的再沉积生物颗粒。因此，纯页岩型与页岩夹灰质介壳纹层-薄层型组合多为远离湖盆边缘的半深湖沉积，页岩多

为黏土质页岩及介壳灰质页岩;页岩夹砂岩型组合类型为靠近湖盆边缘碎屑物源区的浅湖沉积,页岩多为含粉砂或粉砂质页岩,反映出湖盆位置及其沉积环境对页岩岩相及组合类型具有重要控制作用。不同类型页岩岩相烃源(TOC)与储集层宏观参数(孔隙度)统计分析表明,黏土质页岩 TOC 介于0.10%~3.03%,平均值为1.29%,孔隙度介于1.01%~8.42%,平均值为4.40%;介壳灰质页岩 TOC 介于0.79%~1.71%,平均值为1.18%,孔隙度介于1.43%~8.33%,平均值为4.61%;粉砂质页岩 TOC 介于0.22%~1.92%,平均值为0.83%,孔隙度介于1.11%~5.17%,平均值为2.18%。整体上黏土质页岩与介壳灰质页岩(黏土质页岩与介壳灰质页岩以半深湖、静水环境沉积为主,利于成烃生物富集)的 TOC 与孔隙度的平均值均较粉砂质页岩(粉砂质页岩以浅湖环境沉积为主,陆源输入,不利于有机质富集)高,揭示出页岩岩相类型对烃源与储集宏观特征具有较好的控制作用。

3.2 有机相对烃源品质与储集有效性的控制

页岩有机质类型是确定生油气结构及评价生油气潜力的重要指标。I型干酪根(腐泥型)主要来源于水生生物藻类,生油潜力高;II型干酪根(混合型)根据来源不同,可分为II₁型(偏腐泥型)和II₂型(偏腐殖型)两种,前者生烃、生油能力均高于后者;III型干酪根(腐殖型)来源于陆地高等植物,生烃、生油潜能最低,以生气为主。杨万里等建立的中国陆相烃源岩生烃模式显示,4种类型有机质最大产烃率分别为43%、28%、20%、7%,I型和II₁型的最大产烃率在生油主峰附近,生成物中油多气少,而II₂型和III型的最大产烃率在干气阶段,生成物中气多油少。从不同类型有机质总产烃率来看,I型最高,可达80%,生油、生气能力均是最强的;其次为II型,一般在40%~60%,II₁型生油、生气能力均好于II₂型;III型最低,不足30%,尽管III型以生气为主,但实质上它的生气能力远不如I型和II型。

四川盆地自流井组东岳庙段与大安寨段页岩II₁、II₂及III型有机质均有发育,且不同地区同一页岩层段、同一地区同一页岩层段有机质类型均具有多样性的特点。涪陵地区FY10井东岳庙段东一亚段富有机质页岩厚28 m,自下而上①至④小层 TOC 平均值分别为1.64%、1.60%、1.67%、2.04%,且纵向上有机质类型存在明显变化,自下而上依次为III型、II₂

型、II₁型、II₂型,同一口井同一层段(总厚度不大),在 TOC 相近、 R_o 相同的情况下($R_o=1.56\%$),有机质类型差异是决定不同层段生油气能力的关键因素。据此,分析认为③小层生成物油多气少,生烃能力最强,其次为④与②小层,有机质类型均为II₂型,生成物气多油少,但④小层 TOC 略高,故生烃能力好于②小层,①小层生成物以气为主,生烃能力相对最差。元坝地区YY2井大安寨段大二亚段两个富有机质页岩层段②、④小层 TOC 平均值分别为1.06%、1.22%,孔隙度平均值分别为3.95%、4.29%,具有源高、储高的特点(见图8)。进一步从有机质类型来看,②小层中下部为II₂型,上部为III型,而④小层下部与上部为II₂型,中部为II₁型,整体上④小层好于②小层,生油气能力更强、储集性更好。

3.3 高压-超高压对页岩油气富集的控制作用

保存条件是控制页岩油气富集的关键^[21-22],而影响保存条件优劣的有构造演化、抬升剥蚀、断裂与裂缝、顶底板条件、地层压力等多种因素^[23],但对于大套厚层的泥页岩层段而言,多数情况下顶底板条件相对较好,而断裂与裂缝的发育对于页岩油气保存具有两面性,压力系数是反映保存条件的最直接证据^[16],目前中国海相页岩气勘探开发实践也已充分证实,地层压力系数与单井产量关系密切,高压-超高压井高产稳产效果好,而常压井产量相对低,稳产效果也相对差。对于四川盆地自流井组而言,川中、川北地区整体构造相对稳定,仅局部发育少量断裂,地层平缓,川中北部盐亭—西充—蓬安以北的地区,大安寨段地层压力系数普遍大于1.2,且具有由南向北增高趋势,异常高压有助于天然气和原油的流动,有利于油气的产出,为油气的稳产提供条件^[17]。川北元坝已有钻井压力系数(见表1)多大于1.3,具有高压—超高压特征。川东高陡褶皱带地区,尽管多个背斜、向斜呈现隆凹相间的格局,但从目前构造解释与钻井的实际钻探情况来看,向斜主体区构造裂缝欠发育。地层压力实测发现,多口井自流井组的压力系数大于1.20,如涪页10井东岳庙段压力系数达1.75,XL3井东岳庙段压力系数为1.48,FS1井大安寨段压力系数为1.38^[24],FY10井东岳庙段测试获日产油17.6 m³,日产气5.6×10⁴ m³,实现了该区陆相页岩油气重大勘探突破,揭示出川东向斜区良好的保存条件和页岩油气勘探潜力,对推进川东地区向斜区高压-超高压型陆相页岩油气勘探具有重要作用。

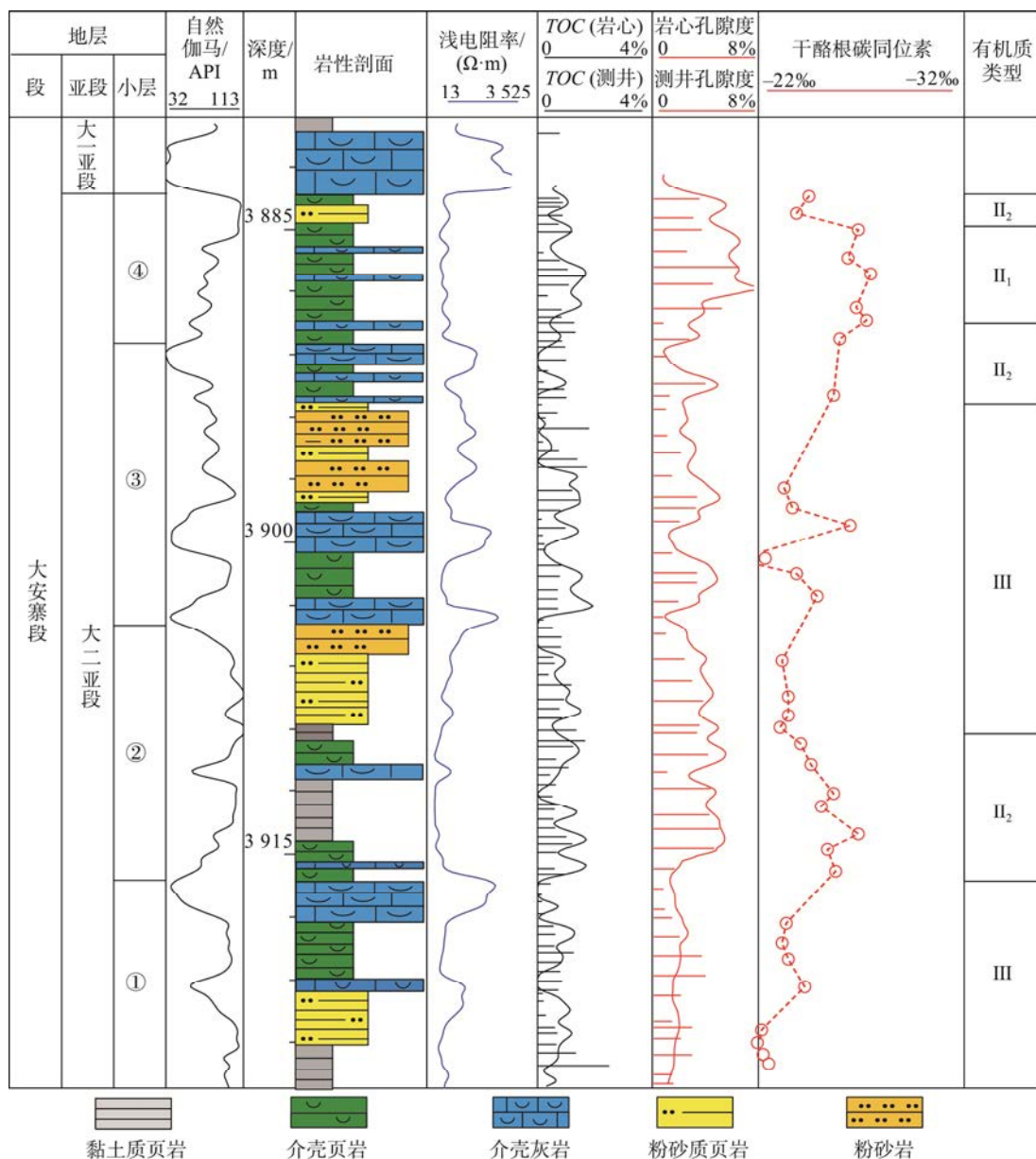


图8 YY2井大安寨段大二亚段纵向上有机质类型变化特征

Fig.8 Vertical variation characteristics of organic types in the Second Subsegment of the Well YY2 Daanzhai Member

3.4 微裂缝提高储集性能与压裂效果促进页岩油气高产

大型断裂与裂缝发育带往往不利于页岩油气保存。川中地区大安寨段岩心与薄片可见低角度及水平缝，页理和纹理也较发育，随着 R_0 的增大，生气量增大、压力增大，形成高压地层，（泥质）介壳灰岩相对易破裂产生（微）裂缝，且大二亚段页岩中脆性矿物含量较高，有利于压裂改造，泥页岩夹（泥质）介壳灰岩可获得较高的单井产量^[12]。川东复兴FY1、FY10、XY1、XY2东岳庙段、川北元坝YL4、YL30、YY2与阆中LY1大安寨段等地区10

多口钻井岩心分析表明，页岩段基本不发育构造裂缝，且普遍具有高压-超高压特征，但富有机质纯页岩段浸水后多可见大量毫米级水平页理缝发育，厘米级介壳灰岩层段与页岩层转换处可见少量水平裂缝，氩离子抛光-扫描电镜下发育不同程度的齿状近水平微米级微裂缝，普遍发育个体相对大的条带状、块状等有形态暗色有机质边缘也多可见纳米级微裂缝，毫米级到纳米级不同尺度微裂缝与黏土矿物层间狭缝形无机质孔隙及有机质孔隙构成了储集孔-缝网络系统，微裂缝起到了良好的沟通作用，提供储集空间的同时显著提高了孔隙连通性（见图

9)。川东北平安1井侏罗系凉高山组研究表明,页岩中普遍发育水平或波状的页理缝,与斜交缝交织成网状,沟通了各类无机矿物质孔隙与有机质孔隙,

极大地改善了页岩的储集能力和渗流能力^[10],有利于油气富集并提高压裂改造效果,证实不同尺度微裂缝的良好发育是页岩油气井获得高产的关键。

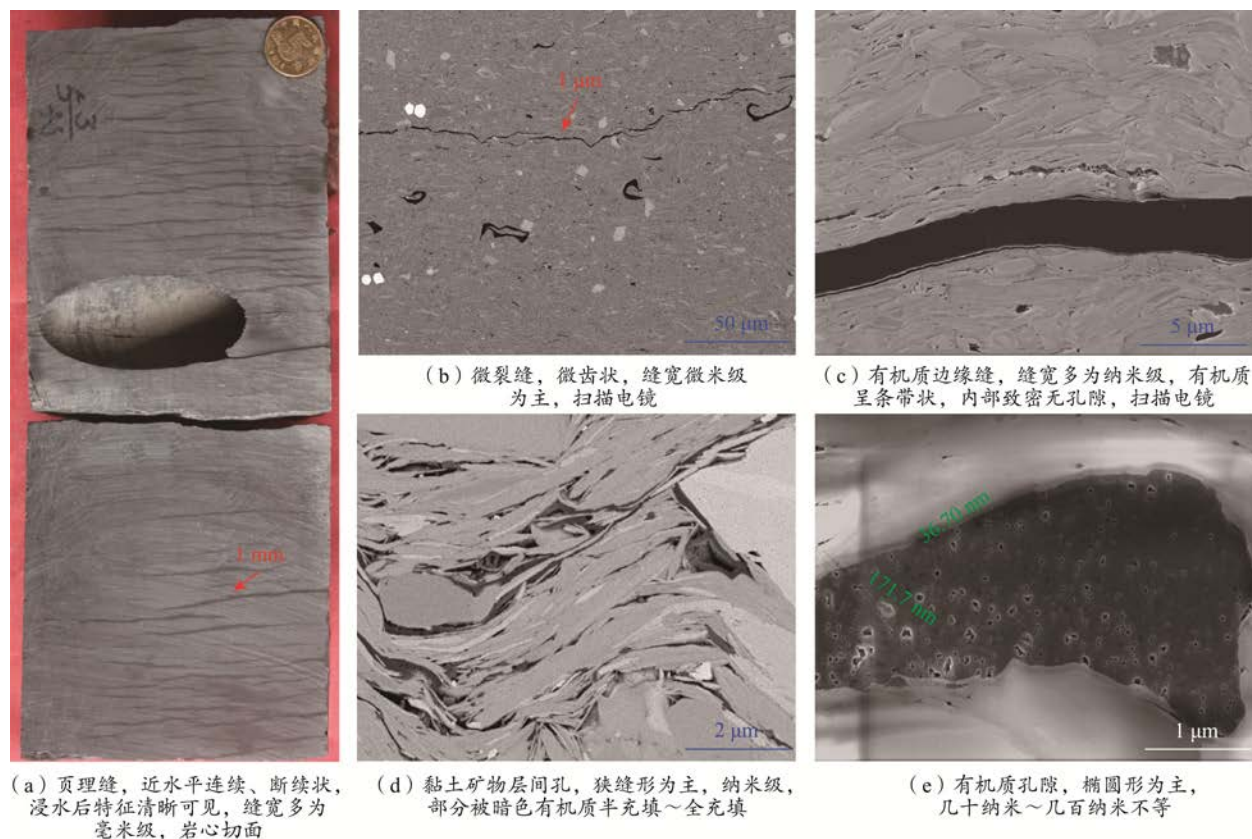


图9 四川盆地XL101井东岳庙段不同尺度孔缝发育特征

Fig.9 Development characteristics of different scale fractures in Well XL101 Dongyuemiao Member in Sichuan Basin

4 油气勘探与研究建议

4.1 加强重点地区地质-开发-工程一体化技术攻关, 力争早日实现侏罗系陆相页岩油气规模商业开发

从目前四川盆地中国石化各矿权区侏罗系页岩油气富集地质条件研究与页岩油气探井的试采效果来看,复兴地区的资源潜力、勘探层段数量及油气突破效果均展现了较为明显的优势,但不同钻井油气试采效果仍存在差异,推测可能与其部署在向斜区的不同构造部位、油气保存条件存在差异有关,建议加强复兴地区不同构造单元、宽向斜与窄向斜、向斜不同位置保存条件差异性的深入研究;开发上应针对油气同产,平面上不同地区及纵向上不同层段 R_o 的变化可能导致的油气比的差异,更加注重页岩凝析油气的开发技术攻关及开采方案的

制定;工程上加强高黏土矿物含量页岩与不同厚度介壳灰岩夹层条件下的适应性压裂工程技术的攻关,以及压后效果的深入评价。

4.2 加强非常规页岩油气与常规油气整体综合评价研究与勘探部署

四川盆地中下侏罗统东岳庙段、大安寨段、千佛崖组(凉高山组)3套富有机质页岩均富含油气,中国石化拥有涪陵、元坝、建南、阆中、普光等多个矿权区,但不同矿权区有利勘探层系、岩性组合、油气结构及埋藏深度等均存在差异,建议多地区、多层系统筹考虑,油气并举、立体勘探、有序开发,最大限度获得油气资源;涪陵大安寨段灰岩(FY8-1井)与凉高山组页岩与砂岩(TY1井、Z1井)、普光千佛崖组砂岩(PL3井、PL4井)等常规领域也均有钻井获得了油气突破,建议加强页岩油气与常规油气整体地质综合评价研究与勘探部署。

5 结论

(1) 研究区陆相富有机质页岩岩相及组合类型多样,以富含方解石介壳纹层为特点;页岩物性明显好于介壳灰岩与粉砂岩夹层,其中以黏土质页岩与介壳灰质页岩宏观物性与微观孔隙(类型、结构)最佳;整体保存条件好,具有构造稳定、高压超高压特征,油气同产。

(2) 基于岩相、烃源、储集、保存及含油性等研究,认为半深湖优质页岩岩相是页岩气富集的物质基础;有机质类型与成熟度控烃控储是页岩气富集的关键因素;良好保存条件(构造稳定与地层超压)是页岩气富集高产的重要保障;微裂缝发育有利于页岩油气高产。即研究区中高成熟度陆相富有机质页岩具有“两相控烃控储、压缝控富控产”的陆相页岩油气富集规律。

(3) 基于目前四川盆地侏罗系页岩油气勘探实践情况,提出加强重点地区地质-开发-工程一体化技术攻关;加强非常规页岩油气与常规油气整体综合评价研究与勘探部署。

参考文献:

- [1] 邹才能, 杨智, 王红岩, 等. “进源找油”: 论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田[J]. 地质学报, 2019, 93(7): 1551-1562.
ZOU C N, YANG Z, WANG H Y, et al. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Jurassic unconventional continental giant shale oil & gas field in Sichuan Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(7): 1551-1562.
- [2] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 155-171.
MA Y S, CAI X Y, ZHAO P R, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(1): 155-171.
- [3] 胡宗全, 王濡岳, 刘忠宝, 等. 四川盆地侏罗统陆相页岩气源储特征及耦合评价[J]. 地学前缘, 2021, 28(1): 261-272.
HU Z Q, WANG R Y, LIU Z B, et al. Source-reservoir characteristics and coupling evaluations for the Lower Jurassic lacustrine shale gas reservoir in the Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2021, 28(1): 261-272.
- [4] 焦方正, 邹才能, 杨智. 陆相源内石油聚集地质理论认识及勘探开发实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1067-1078.
JIAO F Z, ZOU C N, YANG Z. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1067-1078.
- [5] 杨跃明, 黄东. 四川盆地侏罗系湖相页岩油气地质特征及勘探开发新认识[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 22-33.
YANG Y M, HUANG D. Geological characteristics and new understandings of exploration and development of Jurassic lacustrine shale oil and gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 22-33.
- [6] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 等. 四川盆地拔山寺向斜泰页1井页岩油气重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(2): 21-32.
HU D F, WEI Z H, LIU R B, et al. Major breakthrough of shale oil and gas in Well Taiye 1 in Bashansi syncline in the Sichuan Basin and its significance[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(2): 21-32.
- [7] 舒志国, 周林, 李雄, 等. 四川盆地东部复兴地区侏罗系自流井组东岳庙段陆相页岩凝析气藏地质特征及勘探开发前景[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 212-223.
SHU Z G, ZHOU L, LI X, et al. Geological characteristics of gas condensate reservoirs and their exploration and development prospect in the Jurassic continental shale of the Dongyuemiao Member of Ziliujing Formation, Fuxing area, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 212-223.
- [8] 郭旭升, 赵永强, 张文涛, 等. 四川盆地元坝地区千佛崖组页岩油气富集特征与主控因素[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 749-757.
GUO X S, ZHAO Y Q, ZHANG W T, et al. Accumulation conditions and controlling factors for the enrichment of shale oil and gas in the Jurassic Qianfoya Formation, Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 749-757.
- [9] 孙莎莎, 董大忠, 李育聪, 等. 四川盆地侏罗系自流井组大安寨段陆相页岩油气地质特征及成藏控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 124-135.
SUN S S, DONG D Z, LI Y C, et al. Geological characteristics and controlling factors of hydrocarbon accumulation in terrestrial shale in the Da'anzhai Member of the Jurassic Ziliujing Formation, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(1): 124-135.
- [10] 何文渊, 何海清, 王玉华, 等. 川东北地区平安1井侏罗系凉高山组页岩油重大突破及意义[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 40-49.
HE W Y, HE H Q, WANG Y H, et al. Major breakthrough and significance of shale oil of the Jurassic Lianggaoshan Formation in Well Ping'an 1 in northeastern Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 40-49.
- [11] 刘忠宝, 刘光祥, 胡宗全, 等. 陆相页岩层系岩相类型、组合特征及其油气勘探意义: 以四川盆地中下侏罗统为例[J]. 天然气工业, 2019, 39(12): 10-21.
LIU Z B, LIU G X, HU Z Q, et al. Lithofacies types and assemblage features of continental shale strata and their significance for shale gas exploration: A case study of the Middle and Lower Jurassic strata in the Sichuan Basin[J].

- Natural Gas Industry, 2019, 39(12): 10-21.
- [12] 张宇, 杜垚, 刘耘, 等. 四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气基本特征及勘探方向[J]. 中国地质, 2022, 49(1): 51-65.
ZHANG Y, DU Y, LIU Y, et al. Basic characteristics and exploration direction of lacustrine shale oil and gas in Da'anzhai member of Jurassic in Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2022, 49(1): 51-65.
- [13] 刘忠宝, 胡宗全, 刘光祥, 等. 四川盆地东北部下侏罗统自流井组陆相页岩储层孔隙特征及形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(1): 136-145.
LIU Z B, HU Z Q, LIU G X, et al. Pore characteristics and controlling factors of continental shale reservoirs in the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2021, 42(1): 136-145.
- [14] 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等. 四川盆地复合盆山体系的结构构造和演化[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(3): 288-299.
SHEN C B, MEI L F, XU Z P, et al. Architecture and tectonic evolution of composite basin-mountain system in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(3): 288-299.
- [15] 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 中生代多向挤压构造作用与四川盆地的形成和改造[J]. 中国地质, 2011, 38(2): 233-250.
ZHANG Y Q, DONG S W, LI J H, et al. Mesozoic multi-directional compressional tectonics and formation-reformation of Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2011, 38(2): 233-250.
- [16] 李登华, 李建忠, 张斌, 等. 四川盆地侏罗系致密油形成条件、资源潜力与甜点区预测[J]. 石油学报, 2017, 38(7): 740-752.
LI D H, LI J Z, ZHANG B, et al. Formation condition, resource potential and sweet-spot area prediction of Jurassic tight oil in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(7): 740-752.
- [17] 杨跃明, 黄东, 杨光, 等. 四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气形成地质条件及勘探方向[J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(2): 1-12.
YANG Y M, HUANG D, YANG G, et al. Geological conditions to form lacustrine facies shale oil and gas of Jurassic Daanzhai Member in Sichuan Basin and exploration directions[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019, 42(2): 1-12.
- [18] 李世临, 张文济, 李延钧, 等. 川东地区下侏罗统自流井组东岳庙段烃源岩评价[J]. 天然气勘探与开发, 2021, 44(2): 11-18.
LI S L, ZHANG W J, LI Y J, et al. Evaluation on source rocks of Dongyuemiao Member in the Lower Jurassic Ziliujing Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2021, 44(2): 11-18.
- [19] 王世谦, 胡素云, 董大忠. 川东侏罗系: 四川盆地亟待重视的一个致密油气新领域[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 22-29.
WANG S Q, HU S Y, DONG D Z. Jurassic tight oil & gas resources in East Sichuan Basin: A new exploration target[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(12): 22-29.
- [20] 王登, 余江浩, 陈威, 等. 鄂西建南地区自流井组东岳庙段页岩储层特征及含气性[J]. 资源环境与工程, 2020, 34(1): 41-45.
WANG D, YU J H, CHEN W, et al. Geological conditions of shale gas reservoir in the Dongyuemiao member of Ziliujing Formation in Jiannan area, western Hubei Province[J]. Resources Environment & Engineering, 2020, 34(1): 41-45.
- [21] 邱楠生, 冯乾乾, 腾格尔, 等. 川东南丁山地区燕山期—喜马拉雅期差异构造-热演化与页岩气保存[J]. 石油学报, 2020, 41(12): 1610-1622.
QIU N S, FENG Q Q, BORJIGIN Tenger, et al. Yanshanian-Himalayan differential tectono-thermal evolution and shale gas preservation in Dingshan area, southeastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(12): 1610-1622.
- [22] 弓义, 李天宇, 吴凯凯, 等. 涪陵页岩气田五峰组—龙马溪组页岩气保存条件评价[J]. 海相油气地质, 2020, 25(3): 253-262.
GONG Y, LI T Y, WU K K, et al. Evaluation of shale gas preservation condition of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling shale gas field[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(3): 253-262.
- [23] 刘义生, 金吉能, 潘仁芳, 等. 渝东南盆缘转换带五峰组—龙马溪组常压页岩气保存条件评价[J]. 地质科技通报, 2023, 42(1): 253-263.
LIU Y S, JIN J N, PAN R F, et al. Preservation condition evaluation of normal pressure shale gas in the Wufeng and Longmaxi formations of basin margin transition zone, Southeast Chongqing[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(1): 253-263.
- [24] 胡东风, 魏志红, 刘若冰, 等. 湖相页岩油气富集主控因素与勘探潜力: 以四川盆地涪陵地区侏罗系为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 113-120.
HU D F, WEI Z H, LIU R B, et al. Enrichment control factors and exploration potential of lacustrine shale oil and gas: A case study of Jurassic in the Fuling area of the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 113-120.

(编辑: 张凤娟 曹梦迪)