

doi: 10.12029/gc20220104

张宇, 杜焱, 刘耘, 李文皓, 何硕, 王兴志, 庞谦, 黄东. 2022. 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, 49(1): 51-65.

Zhang Yu, Du Yao, Liu Yun, Li Wenhao, He Shuo, Wang Xingzhi, Pang Qian, Huang Dong. 2022. Basic characteristics and exploration direction of lacustrine shale oil and gas in Da'anzhai member of Jurassic in Sichuan Basin[J]. Geology in China, 49(1): 51-65(in Chinese with English abstract).

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

张宇¹, 杜焱¹, 刘耘², 李文皓¹, 何硕³, 王兴志⁴, 庞谦⁴, 黄东²

(1. 中国石油西南油气田公司勘探事业部, 四川 成都 610041; 2. 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041; 3. 中国石油川庆钻探地质勘探开发研究院, 四川 成都 610051; 4. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 西南石油大学, 四川 成都 610500)

摘要:【研究目的】证实四川盆地中部地区大安寨段具备良好的页岩油气勘探潜力。【研究方法】本文通过岩心、薄片、扫描电镜、全岩 X 射线衍射、有机地球化学、三轴应力实验、核磁共振测试等方法分析了大—三—亚段页岩油气形成条件及富集因素。【研究结果】结果表明:大—三—亚段页岩具湖相混合层系、分布广、厚度大、储集空间类型多、物性条件较好、生烃潜力较高、高杨氏模量、低泊松比、脆性矿物含量高的特点,有利于页岩油气的富集和压裂改造。在此基础上综合分析认为,高 TOC 与 II 型有机质的叠加是页岩油气富集的基础;有利的混合沉积层系是页岩油气富集的关键;(微)裂缝控制页岩油气高产。【结论】结合以上认识,选定了龙岗区块、西充—莲池区块作为四川盆地大安寨段湖相页岩油气有利勘探区之一,为下一步川中地区湖相页岩油气勘探与开发提供指导作用。

关键词:页岩油气;大安寨段;湖相混合沉积;富集因素;有利勘探区;油气勘查工程;四川盆地

创 新 点:提出了泥页岩夹薄层介壳灰岩混合层系具有最好的勘探开发价值;建立了四川盆地页岩油气评价标准。

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2022)01-0051-15

Basic characteristics and exploration direction of lacustrine shale oil and gas in Da'anzhai member of Jurassic in Sichuan Basin

ZHANG Yu¹, DU Yao¹, LIU Yun², LI Wenhao¹, HE Shuo³,
WANG Xingzhi⁴, PANG Qian⁴, HUANG Dong²

(1. Exploration Division of PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. Research Institute of Geologic Exploration and Development, Chuanqing Drilling & Exploration Corporation, CNPC, Chengdu 610051, Sichuan, China; 4. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

收稿日期:2020-03-27; 改回日期:2020-07-30

基金项目:国家科技重大专项“四川盆地致密油资源潜力、甜点区预测与关键技术应用”(2016ZX05046006-008)资助。

作者简介:张宇,男,1990生,工程师,从事四川盆地油气地质勘探管理与研究工作;E-mail:zhangyu06@petrochina.com.cn。

Abstract: This paper is the result of oil and gas exploration engineering.

[Objective] In order to confirm that the Da'anzhai member in the central part of Sichuan Basin has great shale oil and gas exploration potential. **[Methods]** This paper analyzes the formation conditions and enrichment factors of the shale oil and gas of Da 1, 3 sub-member by cores, thin section, scanning electron microscope, whole rock X-ray diffraction, organic geochemistry, triaxial stress test, nuclear magnetic resonance test and other methods. **[Results]** The results show that the shale in Da 1, 3 sub-member has the characteristics of mixed lacustrine system, wide distribution, large thickness, multiple types of reservoir space, better physical conditions, high hydrocarbon generation potential, high higher Youngs modulus, low Poissons ratio and high content of brittle minerals, which is conducive to the enrichment and fracturing transformation of shale oil and gas. On this basis, comprehensive analysis shows that the superposition of high TOC and type II organic matter is the basis of shale oil and gas enrichment; favorable mixed sedimentary system is the key to shale oil and gas enrichment; (micro) fractures control shale oil and gas high-production. **[Conclusions]** Combine the above understanding, Longgang block and the Xichong-Lianchi block are selected as one of the favorable exploration areas for Lake shale oil and gas in Da'anzhai section of Sichuan Basin, which will provide guidance for the further exploration and development of shale oil and gas in the central Sichuan area.

Key words: shale oil and gas; Da'anzhai Member; lacustrine mixed deposition; enrichment factor; favorable exploration area; oil-gas exploratin engineering; Sichuan Basin

Highlights: It is put forward that the mixed layer system of shale with thin shell limestone has the best exploration and development value; The evaluation standard of shale oil and gas in Sichuan Basin is established.

About the first author: ZHANG Yu, male, born in 1990, engineer, engaged in petroleum geological exploration management and research in Sichuan Basin; E-mail: zhangyu06@petrochina.com.cn.

Fund support: Supported by National Science and Technology Major Project "Sichuan Basin tight oil resource potential, dessert area prediction and key technology application" (No.2016zx05046006-008).

1 引 言

页岩油气是一种以游离态、吸附态或者溶解等方式赋存于富有机质泥页岩层系或夹层内,源内原位或短距离运移成藏的烃类资源(张金川等,2012;邹才能等,2013;焦方正,2019;杨跃明等,2019)。近年来,随着页岩油气在美国、加拿大、澳大利亚的成功勘探与开发,在国内也受到了广泛的关注和高度的重视(刘文卿等,2016),但主要是针对海相页岩油气(朱彤等,2012)。邹才能等(2019)认为陆相页岩油气才是中国陆上未来“进源找油”最重要的突破对象,特别是四川盆地页岩油可能发现大型非常规陆相页岩油田。

长期以来,针对四川盆地侏罗系大安寨段的石油勘探开发对象主要为大一亚段和大三亚段的介壳灰岩(蒋裕强等,2010;梁狄刚等,2011;陈世加等,2015;杨跃明等,2016;王拥军等,2019)。2019年,针对侏罗系大安寨段的勘探开始进入大一三亚段湖相页岩油气的新阶段。为评价四川盆地中部地区(以下简称川中地区)大安寨段湖相泥页岩含油气性,

2019年7月,西南油气田公司在四川盆地部署了第一口页岩油探井A2H,该井在大一三亚段水平段泥页岩中见5次气侵显示,展现了良好的油气勘探潜力。前人认为大一三亚段是四川盆地页岩油气勘探最具潜力的层位(杨跃明等,2019),该层位是典型的广义湖相混合沉积已经形成共识(丁一等,2013),具有广义上的陆源碎屑与碳酸盐岩层构成交替互层或夹层的混合层系特点。但是,大一三亚段的页岩油气地质研究也存在一些问题:一是前人大多将其作为烃源岩展开研究,储层研究薄弱,相关分析化验工作不系统;二是大安寨段湖相页岩油气富集规律认识不清;三是大安寨段湖相页岩油气与国内海相页岩油气地质条件差异较大,评价指标体系有待建立(郑荣才等,2013;黄东等,2018;杨跃明等,2019),以至迄今为止川中地区页岩油气勘探尚未取得实质性进展。鉴于此,本文以川中地区大一三亚段作为研究对象,结合岩心及相关分析化验资料,较为全面地揭示大安寨段湖相混合层系中页岩油气形成地质条件、富集因素及评价指标,以期四川盆地大安寨段页岩油气勘探提供理论支撑。

2 区域地质背景

四川盆地处于扬子准地台偏西北一侧,是扬子准地台的一个次级构造单元,研究区处于四川盆地龙泉山深断裂以东,华蓥山深断裂以西,包含川北低平构造区南部、川中低平构造区(李勇等,2019; Zhang et al., 2020)(图1a)。由于川中地区处于块状刚性基底,在历次构造运动作用中,川中地块均表现出升降运动,褶皱形变较弱,研究区大安寨段构造整体呈南高北低的区域大单斜,在该单斜背景下发育一系列短轴背斜和鼻状构造,局部构造行迹复杂多变,轴线多呈东西、北东及北西向。

沉积相研究表明,晚三叠世四川盆地周缘存在龙门山古陆、大巴山古陆、康滇古陆等三大古陆,在此古构造-沉积背景下,侏罗纪在晚三叠世的湖盆基础上继续接受沉积,发育三角洲-内陆湖泊,沉积中心分布在蓬溪-南充-达州一带,在这一时期四川盆地大安寨段具有最大的湖盆面积。其中大三亚段为湖盆水进扩展期,沉积滨-浅湖泥及介屑

滩;大一三亚段为最大水进期,沉积湖坡一半深湖泥及重力流沉积;大一亚段为湖盆水退萎缩期,沉积滨-浅湖泥及介屑滩(图1b)。基于露头、剖面和测、录井资料,对川中地区大安寨段地层进行划分对比。研究表明,大安寨段在川中地区厚约56~130 m,按照岩性进一步划分为大一、大一三亚段和大三亚段。其中,大一、大三亚段以灰岩夹薄层泥页岩为主,而大一三亚段发育厚层泥页岩,该套泥页岩厚约20~80 m。根据岩电特征进一步将大一三亚段自上而下划分为大一三a、大一三b、大一三c地层小层,岩性分别为介壳灰岩与黑色页岩不等厚互层,黑色页岩夹薄层介壳灰岩,灰黑色一杂色块状泥页岩(图1b)。

3 页岩油气形成地质条件

3.1 混合沉积特征

3.1.1 岩石类型及组合特征

通过对研究区大安寨段75口钻井的岩心观察和薄片鉴定发现,大一三亚段岩石类型相对单一,

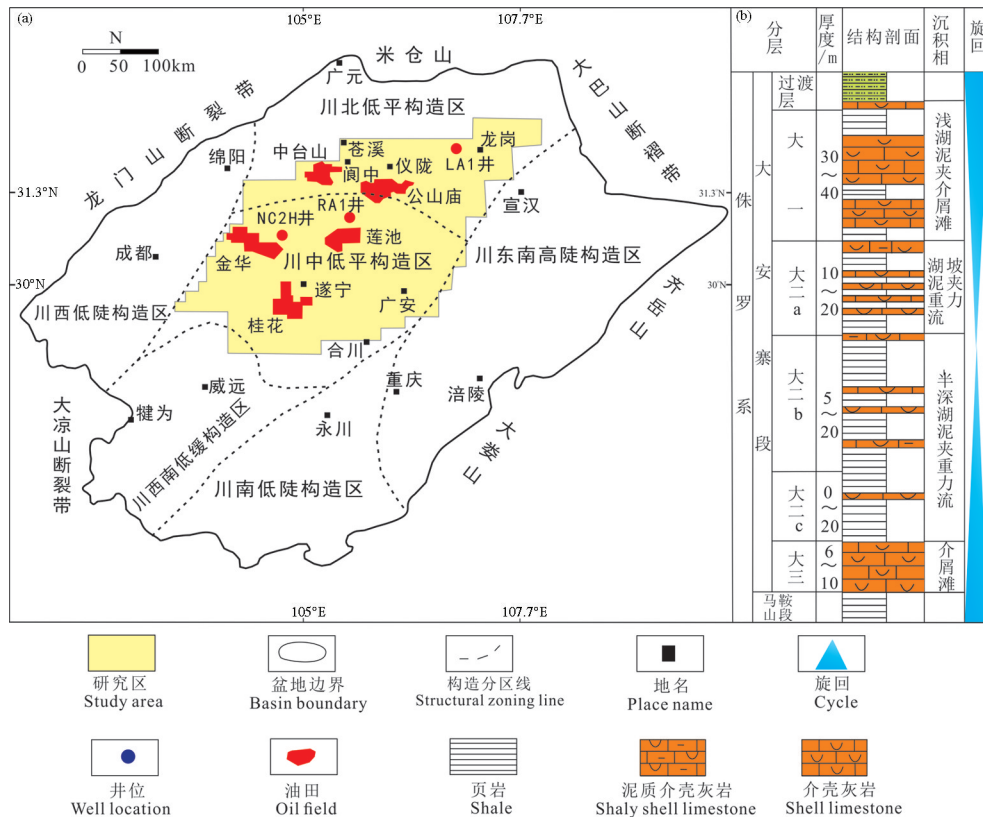


图1 研究区构造位置(a)及地层柱状图(b)
Fig.1 Structural location (a) and stratigraphic histogram (b) of the Sichuan Basin

主要为泥页岩,其次为(泥质)介壳灰岩。考虑到研究层位是典型的广义湖相混合沉积层系,具有岩性转换快,不发育单一岩性的特点,常常发育的是泥页岩与介壳灰岩的交替互层或夹层的混合层系,因此,笔者根据泥页岩与灰岩在大一三亚段的纵向叠置关系划分出3种主要混合层系:(1)泥页岩夹薄层(泥质)介壳灰岩(主要分布于大一三b小层):该层系中泥页岩与灰岩比值大于1:1(图2a),介壳灰岩单层厚1~25 cm(图2b),泥质含量45%~65%,生物含量占40%~50%,生物颗粒多为单一的介形虫类(图2c),少见双壳和腹足碎片化石,指示该岩性组合是典型的深水沉积的产物,而深水环境利于介形虫生长堆积,可形成泥页岩沉积体中的介壳灰岩条带;(2)泥页岩与薄层介壳灰岩互层(主要分布于大一三a小层):泥页岩与介壳灰岩比值近1:1(图2d),泥质含量10%~50%,生物含量占20%~50%,生

物颗粒以发生变形的双壳类为主(图2e),常常呈塑性变形(图2f),表明其主要发育于浅—较深水过渡环境;(3)黑色泥页岩(主要分布于大一三c小层):岩心观察发现,生物化石多为完整的双壳、腹足、介壳虫类,富含有机质(图2g),黄铁矿发育(图2h),反映该类组合发育于较深水的弱动力条件的还原环境。由于在较深的水体下,生物个体较小,壳体较薄,个体完整。页岩质纯、性脆、水平层理、千层饼层理、页理极发育(图2i)。

3.1.2 混合层系与沉积微相的关系

有利混合层系是湖相页岩油气勘探需要重点关注的领域(徐伟等,2019),混合层系与沉积微相具有紧密的联系。通过典型岩心观察与沉积微相分析,揭示了不同混合层系发育的主要沉积环境(表1,图3):从纵向剖面结构上来看,大一三亚段以沉积大套泥页岩为主,泥页岩间往往发育重力流成



图2 大一三亚段岩石类型及组合特征

Fig.2 Rock types and combination characteristics of Da 1,3 sub-member of Jurassic

表1 大-三-亚段混合层系与沉积微相关系

Table 1 Relationship between the mixed strata and sedimentary microfacies of Da 1,3 sub-member

混合层系类型	解释	沉积微相	主要分布层位
泥页岩与薄层介壳灰岩互层	多见塑性变形、透镜体,在向半深湖方向倾斜相对较窄的湖坡相带形成泥页岩与灰岩的互层	湖坡重力流与湖坡泥	大-三-a
黑色泥页岩夹薄层介壳灰岩	正粒级递变、如火焰构造、槽模等,指示重力流沉积;远源堆积形成纹层、条带状灰岩夹层,近源堆积形成薄层状灰岩夹层	半深湖重力流与半深湖泥	大-三-b
黑色块状纯泥页岩	颜色呈黑色,富含有机质,发育水平层理,见黄铁矿,指示低能、缺氧的沉积环境	湖坡-半深湖泥	大-三-c

因灰岩(图2a),形成泥页岩夹薄层介壳灰岩的混合层系(图2a),该类混合层系具有随机分布的现象。本次研究还在部分井中观察到,大-三-b小层中的大套泥页岩夹层具有纹层、条带,或者薄层状3种类型,反映滨浅湖的介壳滩在湖浪等外界触发下崩塌,使介壳滩沉积物源源不断流向深水,形成异地重力流沉积,远源则以泥页岩夹纹层或者条带产出(图2b),近源则形成薄夹层(图2a)。在大-三-b小层-大-三-a小层具有泥页岩与灰岩互层的混合层系,泥页岩中的变形构造较为常见(图2d),推测该混合层系发育于浅湖和半深湖交界的湖坡区域,由

于该位置具有一定的坡度,在向半深湖方向倾斜和相对较窄的相带,快速堆积的异地重力流灰岩与泥页岩互层发育;而平面展布上,重力流灰岩在半深湖亚相的任意位置发育,因此形成的泥页岩夹薄层介壳灰岩具有随机、区域广的特点,而在湖坡的狭窄位置则形成泥页岩与灰岩频繁互层的混合层系,但分布范围小,厚度薄。

3.2 储层特征

3.2.1 孔隙类型

宏观裂缝网络或基质微观孔隙被认为是页岩油富集的两种重要的储集空间(姜在兴等,2014),

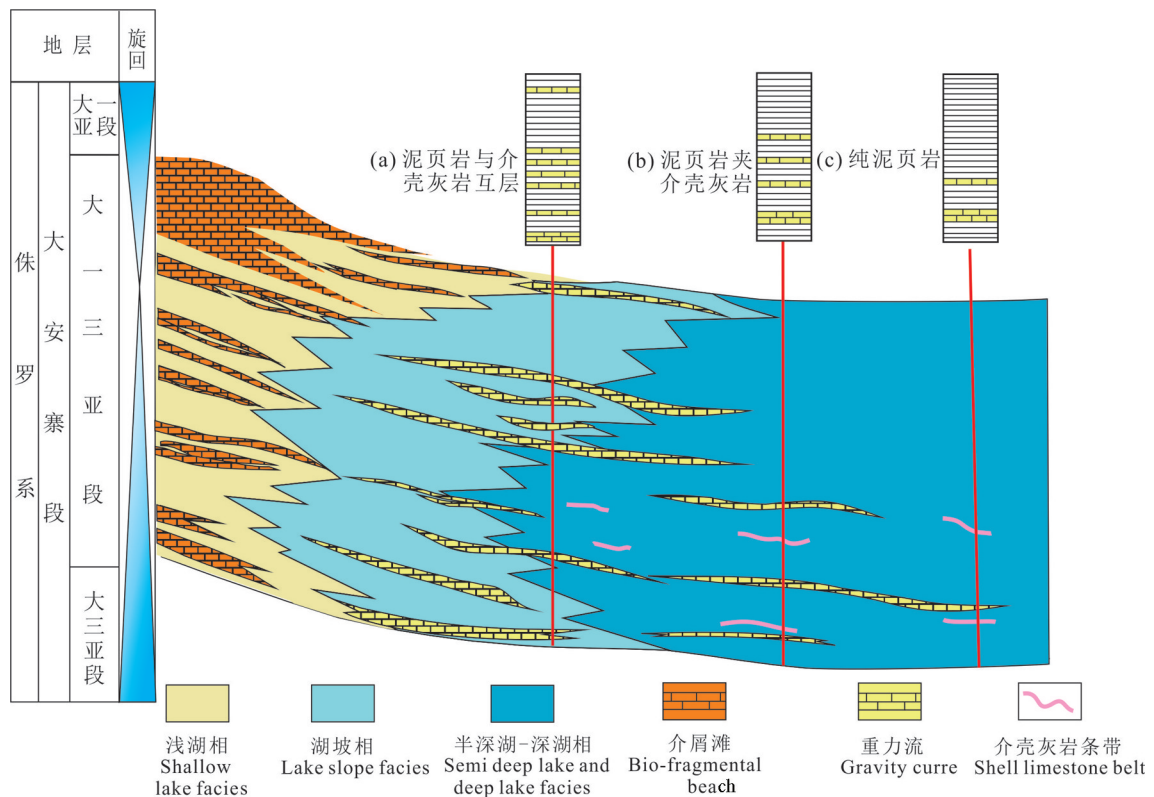


图3 大-三-亚段混合层系发育模式图

Fig.3 Development model of mixed strata in Da 1,3 sub-member of Jurassic

基于该认识,笔者从宏观与微观尺度上,以钻井岩心描述、薄片鉴定和场发射扫描电镜分析为基础,识别出宏观孔隙($50\ \mu\text{m}\leq\text{孔径}$)、微观孔隙($1\ \mu\text{m}<\text{孔径}<50\ \mu\text{m}$)以及超微孔隙(孔径 $\leq 1\ \mu\text{m}$)(应凤祥等,2002;邹才能等,2011)。

宏观尺度的裂缝网络和孔隙包括:(1)不规则小溶孔:孔径一般为 $0.5\sim 1\ \text{mm}$,孔内被少量有机质和亮晶方解石半充填,多属于早期各种孔隙经过溶蚀扩大后的产物(图4a);(2)层理缝:页岩水平层理极为发育,导致形成具有千层饼构造(图2i);(3)成岩缝:区内成岩缝为压溶而成的缝合线,宽一般为 $0.01\sim 0.8\ \text{mm}$,幅度在 $0.1\sim 3\ \text{cm}$,沿缝合线可见溶孔和溶蚀扩大现象(图4b)。

微孔和超微孔隙包括:(1)微裂缝:宽度一般为 $20\ \mu\text{m}$ 以上(图4c),有近于统一的延伸方向或呈网格状,可穿过介壳或其他颗粒,其面密度远比大裂缝多,起主要的渗透作用;(2)粒内孔及粒内溶孔:主要是方解石孔、黄铁矿粒间孔及石英颗粒内的溶蚀孔,孔径小于 $1\ \mu\text{m}$ (图4d);(3)超微裂缝:包括层间裂缝、溶蚀缝,缝宽 $400\ \text{nm}$,长 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ (图4e),可在一定程度上改善储层,更为重要的是对非常规储层压裂改造具有重要的意义;(4)有机质孔:其中

有机质孔多为孔径为 $200\sim 600\ \text{nm}$ 的孤立孔(图4f),可改善储层的孔渗性。

3.2.2 孔隙结构特征

(1)物性特征

对研究区内92个页岩样品进行常规物性分析,孔隙度最大为 13.65% ,最小为 0.42% ,平均为 5.92% ;渗透率最大为 $0.5844\ \text{mD}$,最小为 $0.0003\ \text{mD}$,平均值为 $0.092\ \text{mD}$ 。大一三亚段储集空间具有多样性以及复杂性,可用多种实验手段来表征研究区内大一三亚段的储集空间。由于核磁共振可对岩石孔隙中含氢流体的核磁弛豫信号进行测量,通过孔隙中氢离子的响应,可采用 T_2 弛豫时间来表征有效孔隙度,所测的孔隙度在 $3.47\%\sim 10.82\%$,平均孔隙度为 6.2% ;利用酒精孔隙度表征四川盆地大安寨段页岩残余孔隙度发现,106个页岩样品的孔隙度介于 $0.35\%\sim 13.65\%$,平均孔隙度为 5.8% (张金川等,2012;邹才能等,2013;焦方正,2019;杨跃明等,2019)。上述不同方法获取的物性特征表明,整体而言,川中地区大一三亚段页岩储层属于典型的低孔特低渗型储层。

郑荣才等(2016)通过BET方程计算页岩和灰岩比表面积,页岩样品为 $6.8\ \text{m}^2/\text{g}$,灰岩样品为 2.7

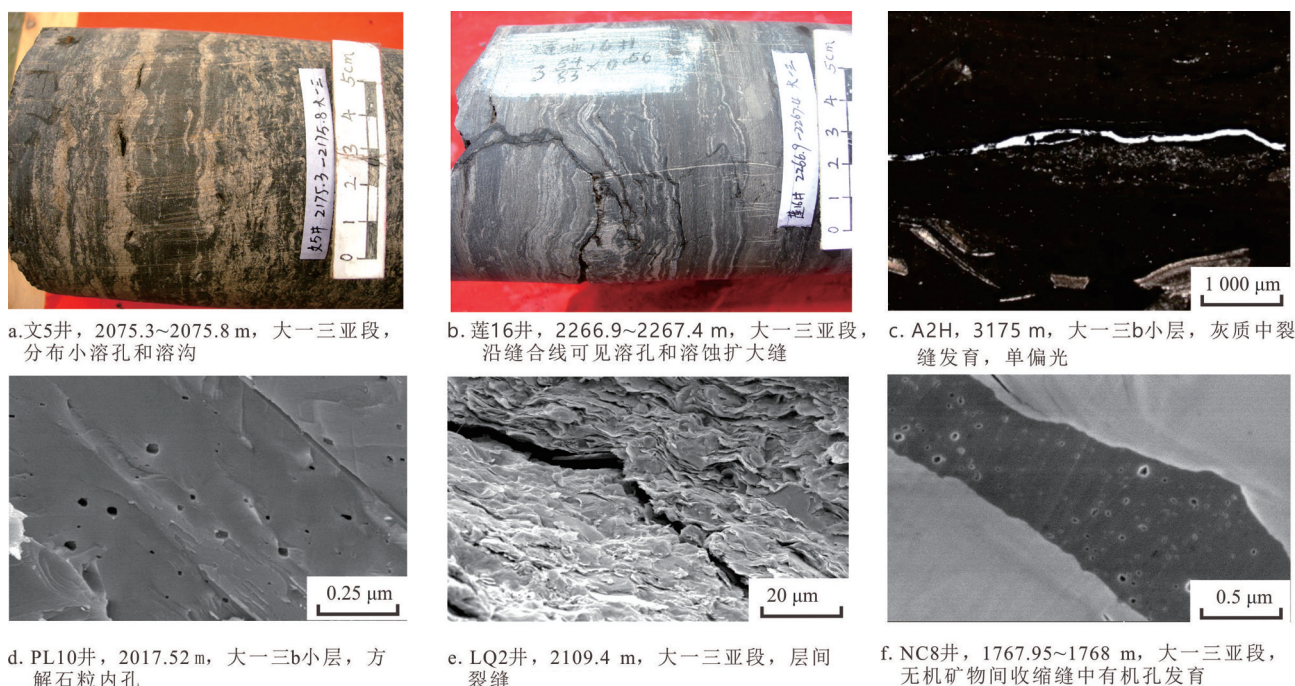


图4 大一三亚段储集空间类型图

Fig.4 Reservoir space types of Da 1,3 sub-member of Jurassic

表2 大一三亚段不同岩性物性统计

地区	岩性	孔隙度/%				渗透率/mD			
		样品数	最小值	最大值	平均值	样品数	最小值	最大值	平均值
蓬莱—龙岗	泥页岩	92	0.42	13.65	5.92	24	0.00031	0.584	0.0916
莲池	泥质介壳灰岩	43	0.32	2.90	1.80	36	0.0004	0.860	0.0645
公山庙		24	0.51	6.57	1.85	24	0.00033	0.092	0.0186
中台山		90	0.44	3.11	1.18	83	0.0003	0.296	0.0568
莲池	含泥质介壳灰岩	310	0.31	2.24	1.32	282	0.00022	0.703	0.0397
公山庙		53	0.42	2.56	1.28	53	0.00019	0.094	0.0145
中台山		254	0.10	2.20	1.06	226	0.0001	0.691	0.717
莲池	介壳灰岩	660	0.13	2.85	0.80	614	0.00049	0.747	0.0190
公山庙		106	0.54	2.13	0.85	106	0.00013	0.720	0.0562
中台山		881	0.23	1.46	0.72	858	0.0002	0.928	0.0612

m²/g,且从本文的物性测试数据来看(表2),泥页岩的平均孔隙度是灰岩的3~5倍,泥页岩渗透率平均值也较灰岩更好,表明泥页岩广泛发育的微孔隙及超微孔隙使泥页岩具有良好的物性条件。各类灰岩整体渗透率平均值较低,但(泥质)介壳灰岩的渗透率可达到0.86~0.928 mD(表2),或与灰岩中裂缝有关,因此,泥页岩夹(泥质)介壳灰岩可在一定程度改善页岩储层的物性条件。

(2) 孔径分布

岩石的孔径大小分布与岩石饱和水状态的核磁共振 T_2 分布谱具有较好的一致性,孔径越大岩样的核磁 T_2 时间越长,孔径越小岩样核磁 T_2 时间越短(刘堂宴等,2003)。因此,可利用 T_2 弛豫时间对大一三亚段页岩孔径分布进行定量测定。分析结果显示(图5),研究层位页岩孔径连续型分布,孔径主要分布在10~100 nm(图5c),主峰位置在20 nm左右的超微孔内,峰型均为前峰型,且孔径分布出现多峰的状态(图5a、b),在0.1~10 μm 尺度仍然具有孔隙的分布(图5c),推测与层间微裂缝有关,与前人运用压汞—吸附联合测定分析对涪陵地区湖相页岩所做的孔径测试结论具有较好的一致性(朱彤等,2017),以甲烷分子被稳定吸附的喉道尺寸临界值及束缚水膜的厚度所计算出的致密油储层临界孔隙半径与研究区大一三亚段页岩的孔径大小相比较(邹才能等,2011),大一三亚段泥页岩的孔隙大小符合油气存储和产出的要求。

3.3 有机地球化学特征

地球化学测试结果(表3)显示,相对大一三c来

说,大一三a小层和大一三b小层具有较好的TOC含量、 S_1 、 S_2 值以及较高 R_o 。具体来看,根据对大一三亚段225个样品分析,TOC分布在0.5%~5.57%,平均值为1.28%,参照页岩油气生成有机碳下限标准 $\text{TOC} \geq 1\%$ (张金川等,2012),57.93%的样品有机碳含量高于1%,达到生烃标准; R_o 主要分布在0.8%~1.5%,平均值为1.07%,与 T_{max} 分析结果相一致(T_{max} 在430~493 $^{\circ}\text{C}$),达到成熟—高成熟阶段,处于富集窗,产率较高(姜在兴等,2014);通过 T_{max} 与氢指数的关系可以发现,有机质类型主要为II₁型和II₂型,虽然少量样品为III型,但总体而言是生油型有机质;对400个岩石热解获得 S_1 和 S_2 参数, S_1 含量在0~4.89 mg/g,平均值为1.06 mg/g, S_2 含量在0~8.79 mg/g,平均值为2.66 mg/g。对照国内外各盆地页岩油气资源分级评价标准(杨华等,2016),研究区大一三亚段烃源岩达到页岩油气生成的标准。

研究区大一三亚段湖相泥页岩厚度大于30 m主要分布于莲池—龙岗地区,分布面积约 4×10^4 km²。需要指出的是美国密执安盆地Antrim页岩气藏最小页岩厚度仅为9.1 m(李新景等,2009),而研究区大部分地区,包括射洪—蓬溪—南充—蓬安—仪陇—南部—盐亭一带页岩厚度大于10 m,因此研究区页岩厚度大、分布广,具备形成页岩油气藏的条件。而研究区泥页岩埋深处于1500~3500 m,总体呈北深南浅的趋势。结合 R_o 来看,遂宁—南充之间埋深1500~1800 m以产页岩油为主,南充—仪陇之间埋深1800~3500 m以产页岩油气为主,而仪陇—平昌之间埋深3500~4000 m以页岩气为主(图6)。

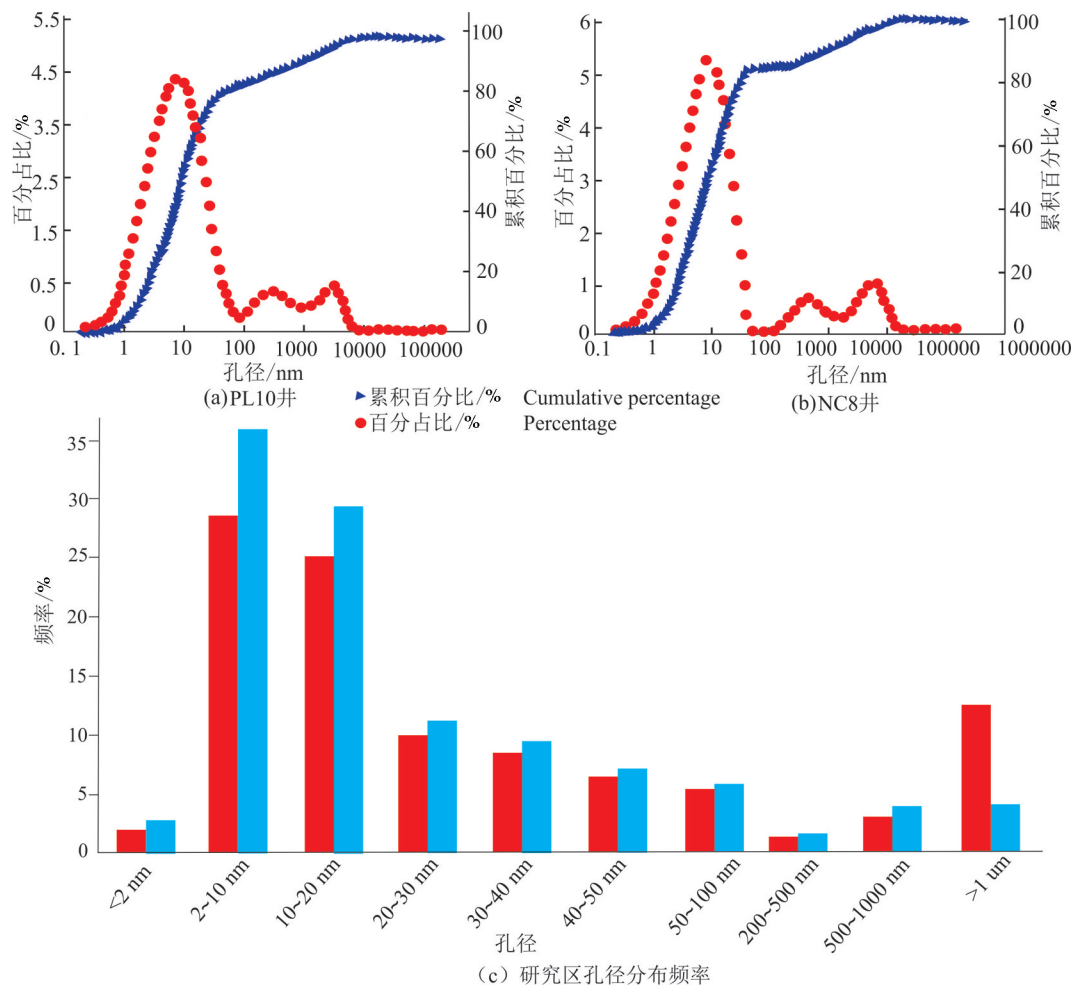
图5 大—三—亚段核磁共振 T_2 弛豫孔径分布图Fig.5 T_2 relaxation pore size distribution of Da 1,3 sub-member of Jurassic

表3 大—三—亚段地球化学测试结果

Table 3 Geochemical test results of Da 1,3 sub-member			
地球化学类型	大—三—a小层	大—三—b小层	大—三—c小层
厚度/m	10~20	5~20	0~20
TOC/%	区间 0.55%~4.87%	0.65%~5.57%	0.5%~3.4%
	平均值 1.30%	1.67%	1.08%
R_o /%	区间 0.81%~1.4%	0.83%~1.4%	0.80%~1.2%
	平均值 1.2%	1.08%	0.95%
S_1 /(mg/g)	区间 0.46~4.89	0.76~4.23	0~3.2
	平均值 1.27	1.05	0.86
S_2 /(mg/g)	区间 1.72~6.89	1.58~8.79	1.45~6.97
	平均值 2.86	2.83	1.57
成熟度	成熟—高成熟	成熟—高成熟	成熟—高成熟
有机质类型	II ₂	II ₂	II ₂ 、III

3.4 页岩可压裂性

对川中地区 140 余个页岩样品进行 X 射线衍射全岩分析,结果表明,黏土矿物含量平均值为

40.78%,石英含量平均值为 42.96%,方解石含量平均值为 5.56%,斜长石含量平均值为 3.24%,白云石含量平均值为 4.88%,黄铁矿含量平均值为 2.22% (图 7)。从总体上看,脆性矿物(石英、方解石、白云石、斜长石和黄铁矿)的含量介于 35%~63%,平均含量 59.22%,与四川盆地五峰组—龙马溪组的脆性矿物含量相当(刘树根等,2013),易形成天然裂缝和诱导裂缝。

而从蓬莱 10 井页岩三轴抗压实验结果来看,泊松比在 0.252~0.324,杨氏模量在 32.68~75.88 MPa,表现为高杨氏模量,低泊松比,岩石脆性较好,而 X 衍射测试证实泥页中具有较高脆性矿物含量,同时研究区大安寨段泥页岩与灰岩薄夹层的混合沉积导致泥页岩层系中具有更高的脆性矿物含量。因此,较高含量的脆性矿物与天然裂缝的叠加有利于

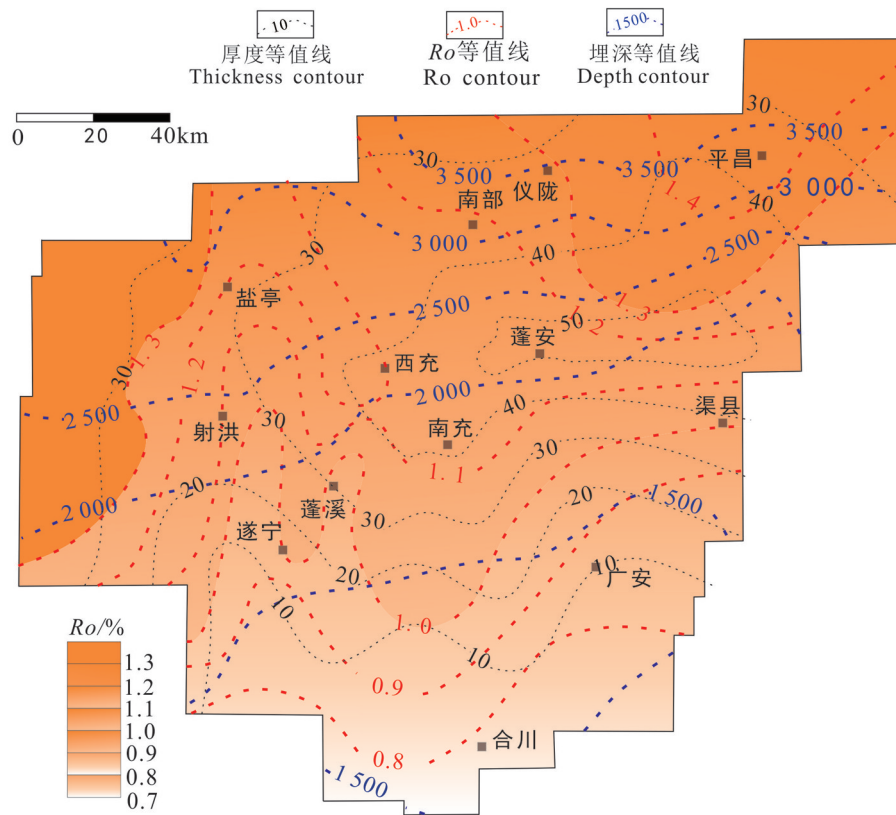


图6 大一三亚段Ro与页岩厚度、埋深叠合等值线图

Fig.6 Contour map of superposition of Ro and shale thickness and buried depth in the Da 1,3 sub-member of Jurassic

页岩储层压裂。

4 页岩油气富集主控因素讨论

针对四川盆地大一三亚段湖相页岩的勘探开发,前人大多将其作为烃源岩展开研究,忽略了页岩源储一体所形成的页岩油气富集因素的研究(郑荣才等,2013;黄东等,2018;杨跃明等,2019)。与已发现页岩油商业性开采的渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地泥页岩储层相比(刘海涛等,2019;黄振凯等,2020),研究区页岩储层具有自己的特点:发育广义混合沉积、中等TOC含量以及较高Ro,对于研究区大一三亚段页岩油气富集因素可形成如下认识。

4.1 有利的有机地球化学条件是页岩油气富集的前提

4.1.1 TOC与有机质类型的叠加是页岩油气富集的基础

研究区大一三亚段TOC分布范围在0.5%~4.27%,均值仅1.28%,与学术界主流观点认为海相TOC一般大于2%才能富集页岩油气不一致,这是否意味着川中地区页岩为油气就不能富集呢?事

实上,从渤海湾盆地沙河街组69口页岩油井的产量与TOC关系来看,该地区TOC含量从小于1%到大于5%均获得过30 t/d以内的页岩油产量(刘海涛等,2019);新墨西哥州圣胡安盆地海陆过渡三角洲Lewis页岩TOC含量仅为0.45%~2.50%,其单井产量可达 $1699 \times 10^4 \sim 5633 \times 10^4 \text{ m}^3$ (朱彤等,2012);而川中地区LQ2在大一三亚段TOC含量为1.48%的井段测试气产量为2659 m^3/d ,上述勘探实例中TOC含量与页岩油富集均不呈明显的相关性。综合来看,页岩油气富集可能还与有机质类型、有机质成熟度及沉积环境等多种因素相关。因此,不能依靠TOC值来“一刀切”式地评价储层,黄东根据TOC与 S_1 的关系将四川盆地页岩油生成的TOC下限值定为1.5%(黄东等,2018),在TOC值大多分布在1.5%~2.0%的LQ2井中大一三亚段测试良好产能是有力的辅证。

从大一三亚段的三个小层来看,TOC与 S_1 具有三段式关系(图8)。大一三a、b、c三个小层内均存在第一段的关系:TOC<0.75%, S_1 <0.75mg/g,随着

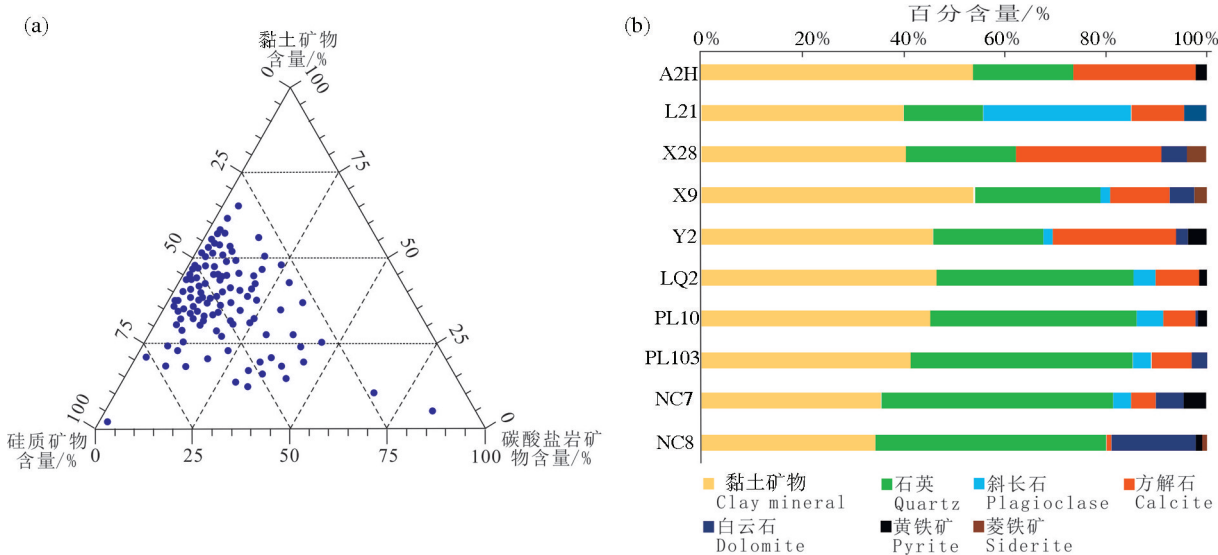


图7 大一三亚段页岩全岩矿物成分三角图(a)与单井矿物成分分布图(b)

Fig.7 Whole rock mineral composition trigonometry (a) and single well mineral composition distribution (b) of shale in the Da 1,3 sub-member of Jurassic

TOC增加, S_1 基本不变, 该段对应着III型干酪根生烃产率较低。因此, 虽然TOC增加, 但基本不生烃; 第二段主要分布在大一三 a、b 两个小层, 该段 $0.75\% < \text{TOC} < 1.5\%$, $0.75 \text{ mg/g} < S_1 < 2 \text{ mg/g}$, 随着TOC增加, S_1 明显增加, 说明该阶段的有机质类型发生了

从III型干酪根到II₁型和II₂型干酪根的转变, 同时, 也说明该段存在着有机质类型越好, 泥页岩中残留的 S_1 越高的现象, 表明有机质类型控制页岩油的富集; 第三段也主要发育在大一三 a、b 两个小层内, 大一三 c 小层缺失该段, 该段 $\text{TOC} > 1.5\%$, $S_1 > 2 \text{ mg/g}$,

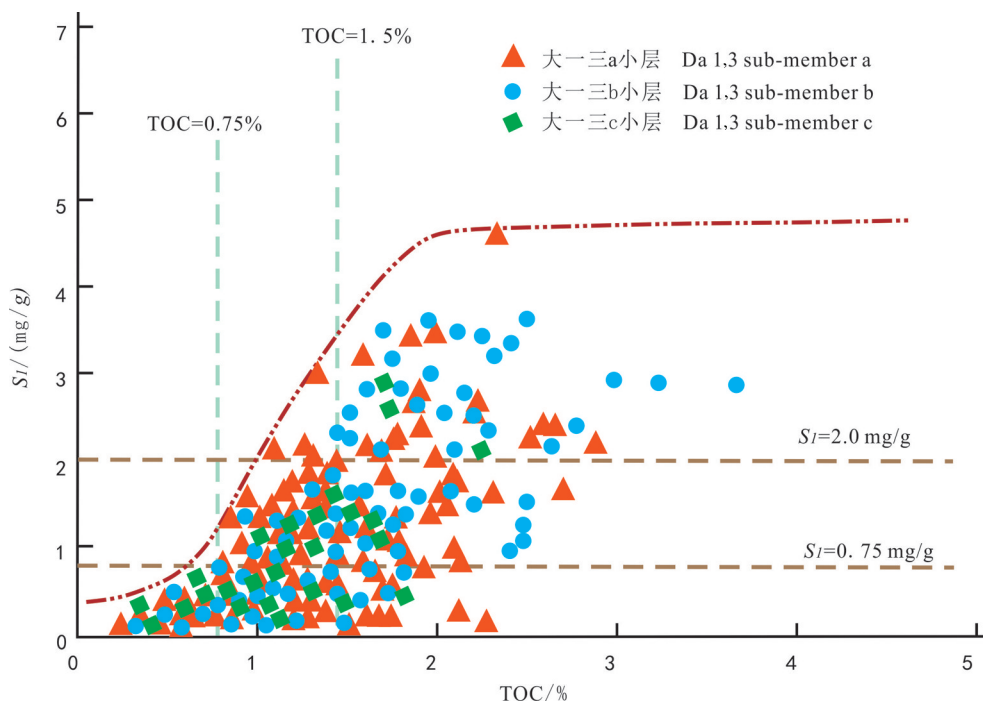


图8 大一三c小层—大一三a小层TOC与 S_1 关系图

Fig.8 Relationship between TOC and S_1 of the Da 1,3 sub-member c layer and Da 1,3 sub-member a layer of Jurassic

虽然该段 TOC 增加,但 S_1 含量基本不再变化,表明泥页岩中已经聚集足够的油气,并且生成的多余的页岩油气可向外排出(黄东等,2018)。总的来说,TOC 越高,有机质类型越好,越有利于页岩油气的生成。

4.1.2 R_o 是页岩油气富集的重要因素

研究区 R_o 主要分布在 0.9%~1.5%,处于成熟—高成熟阶段,与渤海湾盆地济阳拗陷达到工业油流标准的沙三下亚段、沙四上亚段及江汉盆地潜江凹陷潜江组泥页岩 R_o (0.5%~1.4%) 值基本一致,并且渤海湾盆地 R_o 值与页岩油气产量呈明显的正相关(刘海涛等,2019),因此可以推测研究区内同样具有该现象。此外,随着 R_o 的增加,不仅页岩油气的产量会逐渐增加,而且随着页岩油的密度、黏度下降,页岩油可动性将会增加,所以,通常来说较深层热演化程度较高的页岩具有较大的勘探潜力。

4.2 有利的混合层系是页岩油气富集的关键

对世界各大盆地页岩储层研究表明,混合沉积中的有利混合层系对页岩油富集有重要控制作用,典型例子是北美落基山脉地区 Nio-brara 页岩夹薄层灰岩是页岩油的主要产出层段(张金川等,2012;付小东等,2014)。而川中地区 LG9 井、元坝地区 YB21 井(肖继林等,2018)、渤海湾页岩油高产井都表现出了不同的混合层系具有不同页岩油气产量(刘海涛等,2019),其中针对渤海湾 49 口钻井的统计表明,产层为纯泥页岩的 11 口钻井页岩油产量在 3.2~90.6 t,产量在 20 t 以上的有 4 口;产层为泥页岩灰岩互层的 11 口钻井页岩油产量在 2.2~76 t,产量在 20 t 以上的有 6 口;产层为泥页岩夹灰质云岩的页岩油产量变化最大,最高可达到 155 t,最低的只有 1.06 t,27 口钻井中页岩油产量在 20 t 以上的有 8 口。这些勘探实例表明,泥页岩夹薄层介壳灰岩是页岩油气高产的主要混合层系,其次是半深湖的纯泥页岩的混合层系,而泥页岩与介壳灰岩互层是相对不利于页岩油气高产的混合层系。

据上文分析,大一三 a、b 小层孔径较大,或与灰岩夹层有关:一方面,灰岩夹层虽然较薄,物性条件较差,但灰岩孔径较大,泥页岩所生成的原油只需经过极短距离即可聚集成藏;另一方面,泥页岩所夹灰岩中的方解石等脆性矿物含量高,使储层易于改造,而浅湖—湖坡地带水动力条件较强,有机质

不易于保存导致泥页岩与介壳灰岩互层相对不利于页岩油气的聚集。不同混合层系使页岩油气具有不同的富集程度,总的来说,泥页岩夹薄层介壳灰岩混合层系具有最好的勘探开发价值,该混合层系不仅物性条件好,而且也具有有良好的有机地球化学条件(图 9)。因此,四川盆地页岩油气勘探应当高度关注泥页岩与介壳灰岩的混合层系对于页岩油气富集的影响。

4.3 (微)裂缝控制页岩油气高产

川中地区构造平缓,整体受力较弱,页岩裂缝发育程度有限,但研究区局部构造受力相对较强,通过岩心、岩石薄片观察可见大安寨段混合层系低孔、低渗背景下天然裂缝发育,且以低角度和水平缝为主(图 4b、c),页理和纹理也较发育。根据区内三向主应力显示, $\delta_h < \delta_v < \delta_H$, 最大与最小主应力差值为 13 MPa,比值为 1.28~1.30,而龙浅 104 井、公 10 井、蓬莱 10 井的最大主应力方向为近东西向,表明研究区易发育近东西向单向缝。随着 R_o 的增大,生烃量逐渐增大,生成的天然气越多,产生的压力越大,导致形成高压地层;(泥质)介壳灰岩相对易破裂产生(微)裂缝,并且大一三亚段较高的脆性矿物更有利于页岩储层的压裂,因此,泥页岩夹(泥质)介壳灰岩可获得较高的单井产量。勘探表明,与大一三相邻的大一和大三致密灰岩裂缝系统内生产井都取得了较好的产量,如角 8 井日产油达 4.59 t,产气 $2.54 \times 10^4 \text{ m}^3$,角 19 井等井经酸化、压裂措施后产量大幅提高,由此可见,(微)裂缝对产量的提高起控制作用,(微)裂缝不仅提供了部分油气运移通道和储集空间,而且有利于构造期的破裂和深部溶蚀作用叠加形成有效储集空间。

5 页岩油气勘探实践

鉴于川中地区的页岩储层评价标准尚未形成,结合川中地区湖相页岩具有中等 TOC、较高成熟度 R_o 、较高孔隙度及脆性矿物含量适中的典型特征,根据张金川对中国页岩油勘探远景区、有利区和目标区的评价标准(张金川等,2012),选取有机碳含量(TOC) > 1.5%,孔隙度 > 6%,单层厚度 > 10 m,热解参数(S_1) > 2 mg/g,热演化程度(R_o) > 0.7%,脆性矿物含量 > 40%,优势混合沉积层系来对川中地区页岩油气进行综合评价。结果表明,I类有利区的面

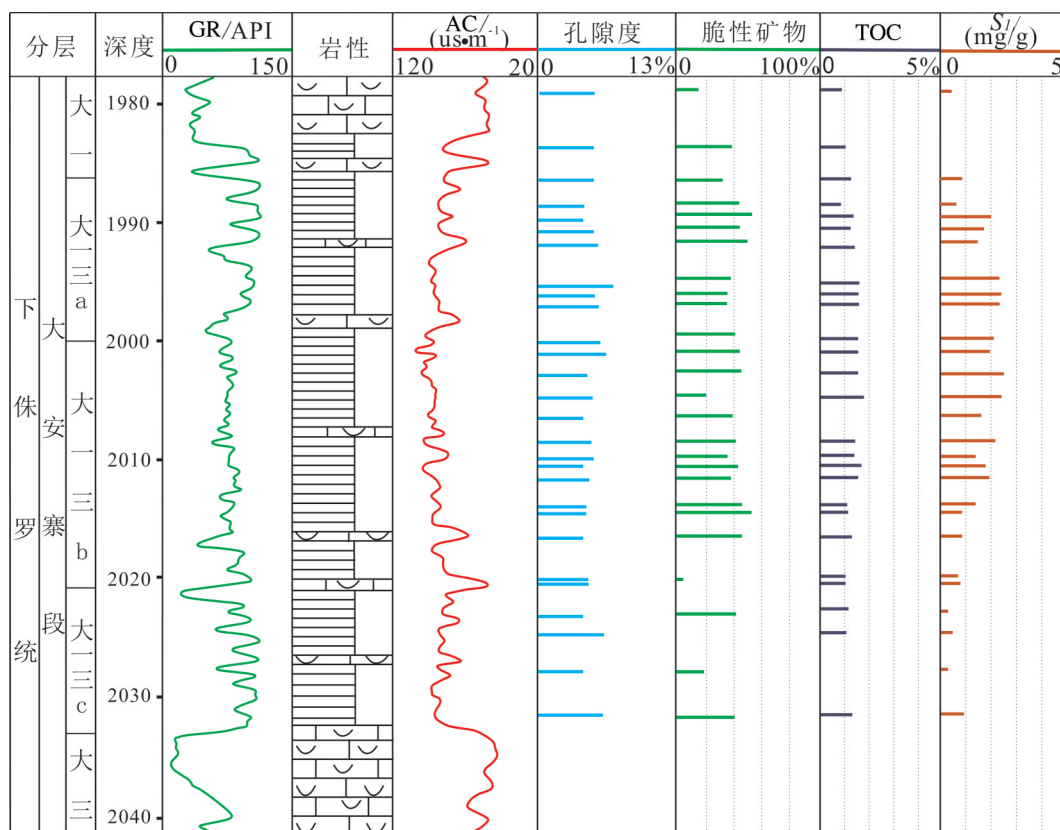


图9 PL10井大安寨段页岩地质特征综合柱状图

Fig.9 Comprehensive histogram of shale geological characteristics in Da'anzhai member of well PL10

积达到 $0.92\times 10^4\text{ km}^2$ 。同时,利用常规测井曲线对区内47口老井TOC、 S_1 、孔隙度、脆性矿物含量等参数进行解释,在此基础上运用叠后随机反演方法对全区TOC、孔隙度进行预测,将TOC大于1.5%作为起算标准,去除其中孔隙度小于6%的页岩分布区域,得到优质页岩厚度分布平面图。根据该方法在I类有利区中优选两个区块,(1)龙岗区块:页岩厚度介于24.3~56.6 m,平均厚度达41.6 m,孔隙度在7.5%~8.9%,平均孔隙度为8.0%;埋深介于2800~3400 m,平均TOC在1.5%~2.0%;(2)西充—莲池区块:页岩厚度介于5.5~40 m,平均厚度为22.3 m,孔隙度在7.9%~10.4%,平均孔隙度为9.1%,平均TOC在1.6%~1.9%。

6 结论

(1)大—三—亚段湖相泥页岩分布广、厚度大,发育3种湖相混合层系,3大类3小类储集空间,属于典型的低孔特低渗型储层,生烃潜力较高,具有高杨氏模量、低泊松比、脆性矿物含量高的特点,有利于页岩油气压裂改造。

(2)TOC与有机质类型的叠加是页岩油气富集的基础;有利的混合层系是页岩油气富集的关键,湖坡一半深湖相发育的泥页岩夹重力流成因的介壳灰岩,是最有利于页岩油气聚集的混合层系,其次是半深湖的纯泥页岩,而湖坡地带发育的泥页岩与薄层介壳灰岩互层是相对较不利的页岩油气富集的混合层系;(微)裂缝控制页岩油气高产。

(3)四川盆地川中地区湖相页岩油气具有较好的勘探前景,特别是川中地区龙岗区块、西充—莲池区块大—三—b—c小层具有较好的生烃潜力,是川中地区页岩油气勘探的有利区。

References

- Chen Shijia, Zhang Huanxu, Lu Jungang, Yang Yueming, Liu Chaowei, Wang Li, Yang Jiajing, Tang Haiping, Yao Yitong, Huang Youlin, Ni Shuai, Chen Yingying. 2015. Controlling factors of Jurassic Da'anzhai Member tight oil accumulation and high production in central Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 42 (2) :186–193 (in Chinese with English abstract).
- Ding Yi, Li Zhiwu, Feng Feng, Zhai Zhonghua, Sun Wei, Tang Cong,

- Zhang Wei, Zhang Changjun, Liu Shugen. 2013. Mixing of lacustrine siliciclastic-carbonate sediments and its significance for tight oil exploration in the Daanzhai Member, Ziliujing Formation, Lower Jurassic, in Longgang area, central Sichuan Basin[J]. Geological Review, 59(2): 389-400 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaodong, Rao Dan, Qin Jianzhong, Shen Baojian, Xu Jin, Yang Zhenheng. 2014. Geological conditions for shale oil forming of Middle Jurassic Dameigou Formation in the northern margin of Caidamu Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 26(6): 20-27 (in Chinese with English abstract).
- Huang Dong, Duan Yong, Li Yucong, Chen Hongbin, Yan Weipeng, Dai Hongming. 2018. Study on the TOC lower limit of shale oil and gas of freshwater lake facies: a case study on the Jurassic Da'anzhai Member in the Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 23(6): 38-45 (in Chinese with English abstract).
- Huang Dong, Duan Yong, Yang Guang, Yan Weipeng, Wei Tengqiang, Zou Juan, Wang Wei, Li Yuchong. 2018. Controlling effect of source-reservoir configuration model on tight oil enrichment in freshwater lacustrine sedimentary area: A case study of the Jurassic Da'anzhai Member in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 39(5): 518-527 (in Chinese with English abstract).
- Huang Zhenkai, Hao Yunqing, Li Shuangjian, Wo Yujin, Sun Dongsheng, Li Maowen, Chen Jianping. 2020. Oil-bearing potential, mobility evaluation and significance of shale oil in Chang 7 shale system in the Ordos Basin: A case study of well H317[J]. Geology in China, 47(1): 210-219 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yuqiang, Qi Lin, Deng Haibo, Wang Yujun, Jiang Chan, Luo Mingsheng. 2010. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potentials of the Jurassic reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 30(3): 22-26 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Zaixin, Zhang Wenzhao, Liang Chao, Wang Yongshi, Liu Huimin, Chen Xiang. 2014. Characteristics and elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 35(1): 184-196 (in Chinese with English abstract).
- Jiao Fangzheng. 2019. Re-recognition of "unconventional" in unconventional oil and gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 46(5): 803-810 (in Chinese with English abstract).
- Li Xinjing, Lü Zonggang, Dong Dazhong, Cheng Keming. 2009. Geologic controls on accumulation of shale gas in North America[J]. Natural Gas Industry, 29 (5): 27-32 (in Chinese with English abstract).
- Li Yong, Chen Shijia, Wang Yuexiang, Su Kaiming, He Qingbo, Qiu Wen, Xiao Zhenglu. 2020. Relationships between hydrocarbon evolution and the geochemistry of solid bitumen in the Guanwushan Formation, NW Sichuan Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 111: 116-134.
- Liang Digang, Ran Longhui, Dai Danshen, He Zixin, Ouyang Jian, Liao Qunshan, He Wenyuan. 2011. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and non-conventional oils in the central-northern Sichuan basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 32(1): 8-17 (in Chinese with English abstract).
- Liu Haitao, Hu Suyun, Li Jianzhong, Wang Jufeng, Wang Qunyi, Jiang Wenya, Jiang Tao, Zhao Changyi, Zhang Chunming, Wu Fengcheng. 2019. Controlling factors of shale oil enrichment and exploration potential in lacustrine Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 30(8): 1190-1198 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shugen, Wang Shiyu, Sun Wei, Ran Bo, Yang Di, Luo Chao, Ye Yuehao, Bai Zhiqiang, Qiu Jiawen, Zhang Xuan. 2013. Characteristics of black shale in Wufeng Formation and Longmaxi Formation in Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 40(6): 621-639 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tangyan, Wang Shaomin, Fu Rongshan, Zhou Mingshun, Luo Man. 2003. Analysis of rock pore throat structure with NMR T₂ spectra[J]. Oil Geophysical Prospecting, 38 (3): 328-333 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wenqing, Tang Dazhen, Pan Weiyi, Zhao Junlong, Zhao Qingmin, Luo Lei. 2016. Comparison of geological characteristics and types of typical shale oil in North America[J]. Bulletin of Science and Technology, 32(11): 13-18 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongjun, Tong Min, Sun Yuanhui, Zhang Yuanzhong, Yuan Dawei. 2019. Reservoir characteristics of Da'anzhai shell limestone tight oil in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 40(1): 42-55 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Jilin, Wei Xiangfeng, Li Haijun. 2018. Difference of accumulation conditions between Fuling marine shale gas and Yuanba-Xinglongchang lacustrine shale gas[J]. Natural Gas Exploration and Development, 41(4): 8-17 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wei, Du Xiaofeng, Huang Xiaobo, Song Zhangqiang, Li Zhengyu. 2019. Research Advances and Critical Issues of "mixed siliciclastic and carbonate sediments"[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37(2): 225-238 (in Chinese with English abstract).
- Yang Hua, Niu Xiaobing, Xu Liming, Feng Shengbin, You Yuan, Liang Xiaowei, Wang Fang, Zhang Dandan. 2016. Exploration potential of shale oil in Chang 7 Member, upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 43(4): 511-520 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueming, Huang Dong, Yang Guang, Li Yucong, Dai Hongming, Bai Rong. 2019. 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, 42(2): 1-12 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueming, Huang Dong. 2019. Geological characteristics and new understandings of exploration and development of Jurassic lacustrine shale oil and gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas

- Industry, 39(6): 22–33 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yueming, Yang Jiajing, Yang Guang, Tao Shizhen, Ni Chao, Zhang Bin, He Xiaodong, Lin Jianping, Huang Dong, Liu Min, Zou Juan. 2016. New research progress of Jurassic tight oil in central Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 43(6): 873–882 (in Chinese with English abstract).
- Ying Fengxiang, Yang Shisheng, Zhang Min, Li Yuxi, Zhou Hongyan. 2002. Application of laser scanning confocal microscope to the measurement of pore texture in reservoirs[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 20(1): 75–79 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, Tang Xuan, Zhu Liangliang, Xing Yawen, Jiang Shengling, Jing Tieya, Yang Shengyu. 2012. Classification and evaluation of shale oil[J]. Earth Science Frontiers, 19(5): 322–331 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Linyan, Ma Licheng, Zhuo Xizhun, Dong Min, Li Bowen, Liu Shengxin, Sun Dongsheng, Wu Di, Zhou Xingui. 2020. Mesozoic–Cenozoic stress field magnitude in Sichuan Basin, China and its adjacent areas and the implication on shale gas reservoir: Determination by acoustic emission in rocks[J]. China Geology, 3(4): 591–601.
- Zheng Rongcai, Guo Chunli, Liang Xiwen, Chang Hailiang, Lu Bingxiong. 2016. Characteristics and evaluation of reservoir spaces of shale gas (oil) in Da'anzhai Member of Ziliujing Formation in Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 28(1): 16–29 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongcai, He Long, Liang Xiwen, Xu Wenli. 2013. Forming conditions of shale gas (oil) plays in the Lower Jurassic Da'anzhai member in the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 33(12): 30–40 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Tong, Bao Shujing, Wang Feng. 2012. The prospect of exploration and production and forming condition of shale gas in land facies, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 32(9): 133–134 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Tong, Yu Lingjie, Wang Feng. 2017. Comparative analysis of the storage conditions and development strategies of the marine and lacustrine shale gas from the Sichuan Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 28(4): 633–641 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Yang Zhi, Cui Jingwei, Zhu Rukai, Hou Lianhua, Tao Shizhen, Yuan Xuanjun, Wu Songtao, Lin Senhu, Wang Lan, Bai Bin, Yao Jingli. 2013. Formation mechanism, geological characteristics, and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 40(1): 14–26 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Yang Zhi, Wang Hongyan, Dong Dazhong, Liu Honglin, Shi Zhensheng, Zhang Bin, Sun Shasha, Liu Dexun, Li Guizhong, Wu Songtao, Pan Zhenglian, Pan Songqi, Yuan Yilin. 2019. "Exploring petroleum inside source rock kitchen": Jurassic unconventional continental giant shale oil&gas field in Sichuan Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 93(7): 1551–1562 (in Chinese with English abstract).
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, Yang Zhi, Wu Songtao, Su Ling, Dong Dazhong, Li Xinjing. 2011. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. Acta Petrologica Sinica, 27(6): 1857–1864 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈世加, 张焕旭, 路俊刚, 杨跃明, 刘超威, 王力, 邹贤利, 杨家静, 唐海评, 姚宜同, 黄圃霖, 倪帅, 陈莹莹. 2015. 四川盆地中部侏罗系大安寨段致密油富集高产控制因素[J]. 石油勘探与开发, 42(2): 186–193.
- 丁一, 李智武, 冯逢, 翟中华, 孙玮, 汤聪, 张薇, 张长俊, 刘树根. 2013. 川中龙岗地区下侏罗统自流井组大安寨段湖相混合沉积及其致密油勘探意义[J]. 地质评论, 59(2): 389–400.
- 付小东, 饶丹, 秦建中, 申宝剑, 许锦, 杨振恒. 2014. 柴达木盆地北缘地区中侏罗统大煤沟组页岩油形成地质条件[J]. 岩性油气藏, 26(6): 20–27.
- 黄东, 段勇, 李育聪, 陈洪斌, 闫伟鹏, 戴鸿鸣. 2018. 淡水湖相页岩油气有机碳含量下限研究——以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. 中国石油勘探, 23(6): 38–45.
- 黄东, 段勇, 杨光, 闫伟鹏, 韦腾强, 邹娟, 王玮, 李育聪. 2018. 淡水湖相沉积区源储配置模式对致密油富集的控制作用——以四川盆地侏罗系大安寨段为例[J]. 石油学报, 39(5): 518–527.
- 黄振凯, 郝运轻, 李双建, 沃玉进, 孙冬胜, 黎茂稳, 陈建平. 2020. 鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系含油气性与页岩油可动性评价——以H317
- 姜在兴, 张文昭, 梁超, 王永诗, 刘惠民, 陈祥. 2014. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 35(1): 184–196.
- 蒋裕强, 漆麟, 邓海波, 王毓俊, 蒋婵, 罗明生. 2010. 四川盆地侏罗系油气成藏条件及勘探潜力[J]. 天然气工业, 30(3): 22–26, 127.
- 焦方正. 2019. 非常规油气之“非常规”再认识[J]. 石油勘探与开发, 46(5): 803–810.
- 黄振凯, 郝运轻, 李双建, 沃玉进, 孙冬胜, 黎茂稳, 陈建平. 2020. 鄂尔多斯盆地长7段泥页岩层系含油气性与页岩油可动性评价——以H31井为例[J]. 中国地质, 47(1): 210–219.
- 李新景, 吕宗刚, 董大忠, 程克明. 2009. 美页岩气资源形成的地质条件[J]. 天然气工业, 29(5): 27–32.
- 李勇, 陈世加, 路俊刚, 肖正录, 何清波, 苏恺明, 李俊良. 2019. 近源间互式煤系致密砂岩气成藏主控因素——以川中地区须家河组天然气为例[J]. 天然气地球科学, 30(6): 798–808.
- 梁狄刚, 冉隆辉, 戴弹申, 何自新, 欧阳健, 廖群山, 何文渊. 2011. 四川盆地中北部侏罗系大面积非常规石油勘探潜力的再认识[J]. 石油学报, 32(1): 8–17.
- 刘海涛, 胡素云, 李建忠, 王居峰, 王群一, 姜文亚, 江涛, 赵长毅, 张春明, 吴丰成. 2019. 渤海湾断陷湖盆页岩油富集控制因素及勘探潜力[J]. 天然气地球科学, 30(8): 1190–1198.
- 刘树根, 王世玉, 孙玮, 冉波, 杨迪, 罗超, 叶玥豪, 白志强, 邱嘉文, 张旋. 2013. 四川盆地及其周缘五峰组—龙马溪组黑色页岩特

- 征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(6): 621-639.
- 刘堂宴, 王绍民, 傅容珊, 周明顺, 李艳华, 罗曼. 2003. 核磁共振谱的岩石孔喉结构分析[J]. 石油地球物理勘探, 38(3): 220-340, 328-333.
- 刘文卿, 汤达祯, 潘伟义, 赵俊龙, 赵清民, 罗磊. 2016. 北美典型页岩油地质特征对比及分类[J]. 科技通报, 32(11): 13-18.
- 王拥军, 童敏, 孙圆辉, 张元中, 袁大伟. 2019. 四川盆地大安寨段介壳灰岩致密油储层特征[J]. 石油学报, 40(1): 42-55.
- 肖继林, 魏祥峰, 李海军. 2018. 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, 41(4): 8-17.
- 徐伟, 杜晓峰, 黄晓波, 宋章强, 李正宇. 2019. 混合沉积研究进展与关键问题[J]. 沉积学报, 37(2): 225-238.
- 杨华, 牛小兵, 徐黎明, 冯胜斌, 尤源, 梁晓伟, 王芳, 张丹丹. 2016. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 43(4): 511-520.
- 杨跃明, 黄东, 杨光, 李育聪, 戴鸿鸣, 白蓉. 2019. 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, 42(2): 1-12.
- 杨跃明, 黄东. 2019. 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, 39(6): 22-33.
- 杨跃明, 杨家静, 杨光, 陶士振, 倪超, 张斌, 何晓东, 林建平, 黄东, 刘敏, 邹娟. 2016. 四川盆地中部地区侏罗系致密油研究新进展[J]. 石油勘探与开发, 43(6): 873-882.
- 应凤祥, 杨式升, 张敏, 李豫喜, 周宏燕. 2002. 激光扫描共聚焦显微镜研究储层孔隙结构[J]. 沉积学报, 20(1): 75-79.
- 张金川, 林腊梅, 李玉喜, 唐玄, 朱亮亮, 邢雅文, 姜生玲, 荆铁亚, 杨升宇. 2012. 页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 19(5): 322-331.
- 郑荣才, 郭春利, 梁西文, 常海亮, 卢炳雄. 2016. 四川盆地大安寨段非常规储层的储集空间类型与评价[J]. 岩性油气藏, 28(1): 16-29.
- 郑荣才, 何龙, 梁西文, 徐文礼. 2013. 川东地区下侏罗统大安寨段页岩气(油)成藏条件[J]. 天然气工业, 33(12): 30-40.
- 朱彤, 包书景, 王烽. 2012. 四川盆地陆相页岩气形成条件及勘探开发前景[J]. 天然气工业, 32(9): 23-28, 133-134.
- 朱彤, 俞凌杰, 王烽. 2017. 四川盆地海相、湖相页岩气形成条件对比及开发策略[J]. 天然气地球科学, 28(4): 633-641.
- 邹才能, 杨智, 崔景伟, 朱如凯, 侯连华, 陶士振, 袁选俊, 吴松涛, 林森虎, 王岚, 白斌, 姚涇利. 2013. 页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J]. 石油勘探与开发, 40(1): 14-26.
- 邹才能, 杨智, 王红岩, 董大忠, 刘洪林, 施振生, 张斌, 孙莎莎, 刘德勋, 李贵中, 吴松涛, 庞正炼, 潘松圻, 袁懿琳. 2019. “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, 93(7): 1551-1562.
- 邹才能, 朱如凯, 白斌, 杨智, 吴松涛, 苏玲, 董大忠, 李新景. 2011. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 27(6): 1857-1864.