

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

刘忠宝^{1,2}, 胡宗全^{1,2}, 刘光祥^{1,2}, 刘珠江³, 刘皓天⁴, 郝景宇³, 王鹏威², 李 鹏²

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国石化勘探分公司, 四川 成都 610041; 4. 中国石化江汉油田分公司勘探开发研究院, 湖北 武汉 430223)

摘要:为查明川东北自流井组陆相富有机质页岩储层孔隙发育特点及形成机理, 采用岩石薄片、全岩X-衍射、有机岩石学、高压压汞-吸附联合测定、氩离子抛光-扫描电镜及物性测试等多种技术方法, 开展了川东北地区自流井组陆相页岩储层孔隙结构、类型及储集性能研究, 并探讨了主要孔隙类型的形成控制因素。研究结果表明: 川东涪陵地区东岳庙段和川北元坝地区大安寨段页岩平均孔隙度均大于4%, 储集性能较好, 页岩孔隙类型主要以无机矿物质孔为主, 其次为有机质孔, 局部发育微裂缝, 无机矿物质孔对孔隙度的贡献最大。页岩粘土矿物含量及压实作用的强弱控制了无机矿物质孔的发育程度, 有机质组分类型是控制有机质孔发育与否的关键因素, 表现为固体沥青内普遍发育有机质孔, 而大多数镜质体内基本不发育有机质孔。川东涪陵地区东岳庙段与大安寨段、川北元坝地区大安寨段无机矿物质孔与有机质孔均有发育, 而川北元坝地区东岳庙段仅发育无机矿物质孔, 有机质孔基本不发育。

关键词:无机矿物质孔; 有机质孔; 孔隙类型; 陆相页岩气; 页岩储层; 自流井组; 侏罗系; 四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Pore characteristics and controlling factors of continental shale reservoirs in the Lower Jurassic Ziliujing Formation, northeastern Sichuan Basin

Liu Zhongbao^{1,2}, Hu Zongquan^{1,2}, Liu Guangxiang^{1,2}, Liu Zhujiang³, Liu Haotian⁴, Hao Jingyu³, Wang Pengwei², Li Peng²

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

3. Southern Company of Exploration, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China;

4. Research Institute of Exploration and Development of Jiangnan Oilfield Branch Company Ltd., SINOPEC, Wuhan, Hubei 430223, China)

Abstract: The development characteristics and mechanisms of pores in the organic-rich continental shale in the Ziliujing Formation of the Yuanba and Fuling areas, northeastern Sichuan Basin, were studied based on an integration of thin-section observation, whole-rock x-ray diffraction and organic matter petrological analyses with measurements obtained jointly through high-pressure mercury intrusion and adsorption experiments, and argon ion polishing-scanning electron microscopy and physical property tests. As a result, the structure, type and storage capacity of the pores as well as the factors controlling the pore growth were revealed. It shows that both the Dongyuemiao Member shale in the Fuling area of eastern Sichuan Basin and Da'anzhai Member shale in the Yuanba area of northern Sichuan Basin have high reservoir capacity with an average porosity higher than 4%. Pores in the shales are mostly inorganic mineral pores, followed by organic-matter pores and some local micro-cracks. The inorganic mineral pores show signs of strong influence of clay mineral and compaction intensity. And the organic-matter pores were probably conditioned by the composition type of organic matter as they are found to be abundant in solid asphalt, but rare in most vitrinites. The Dongyuemiao and Da'anzhai Members of the Fuling area in eastern Sichuan Basin and the Da'anzhai Member of the Yuanba area in northern Sichuan Basin contain both types of pores, while the Dongyuemiao Member of the Yuanba area is

收稿日期: 2020-04-24; 修订日期: 2020-12-18。

第一作者简介: 刘忠宝(1978—), 男, 博士、高级工程师, 层序地层、沉积储层、非常规油气地质。E-mail: liu49731@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05036004); 中国石油化工股份有限公司技术开发项目(P19017-2)。

rich in inorganic mineral pores only.

Key words: inorganic mineral pore, organic-matter pore, pore type, continental shale gas, shale reservoir, Ziliujing Formation, the Jurassic, Sichuan Basin

页岩储层一直是国内外非常规页岩气勘探开发研究领域的热点问题^[1-11],但目前的研究主要集中于海相页岩层系,中国四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩储层的研究普遍认为有机质孔是页岩气的主要储集空间,对于页岩气的富集与产出具有重要控制作用^[12-14]。与海相相比,对陆相页岩储层的研究较少,鄂尔多斯盆地延长组、松辽盆地营城组、渤海湾盆地沙河街组、柴达木盆地侏罗系及准噶尔盆地芦草沟组等陆相页岩的研究,认为有机质成熟度普遍较低, R_o 值主体分布在0.6%~1.1%^[15],多处于生油窗内,页岩无机矿物质孔较发育,有机质孔相对不发育^[16]。四川盆地侏罗系自流井组东岳庙段与大安寨段页岩有机质成熟度(R_o)相对较高,大安寨段 R_o 主体介于1.1%~1.4%^[1],其中川北元坝大安寨段可达1.44%~1.83%^[17],东岳庙段更是介于1.56%~2.02%^[18],已处于高成熟演化阶段,从有机质成熟度的角度来看,有利于有机质孔发育,但目前对于四川盆地自流井组页岩储层的研究较少,储层孔隙究竟以无机孔还是有机质孔为主,以及孔隙形成主控因素等问题尚

缺乏深入研究。为此,本次研究选取川北元坝与川东涪陵两个有机质成熟度相对较高的地区,重点针对自流井组东岳庙段和大安寨段两套页岩,开展页岩孔隙结构、类型及储集性能研究,以期查明页岩主要孔隙类型及其形成控制因素,这对于探索陆相页岩气富集机理,推进四川盆地侏罗系页岩气勘探进程具有重要意义。

1 研究区地质概况

川东北地区自流井组自下而上发育4个岩性段:珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段及大安寨段(图1),其中东岳庙段和大安寨段发育富有机质页岩,目前在川东涪陵地区东岳庙段、川北元坝地区大安寨段均已获得工业页岩气流发现。尽管两套富有机质页岩均以浅湖-半深湖相沉积为主,但不同地区、不同层段沉积环境仍存在差异,表现在川东涪陵地区东岳庙段与大安寨段页岩层系以深灰色-灰黑色介壳纹层状粘土质页岩、粘土质页岩夹介壳灰岩或两者互层发育为主;而川

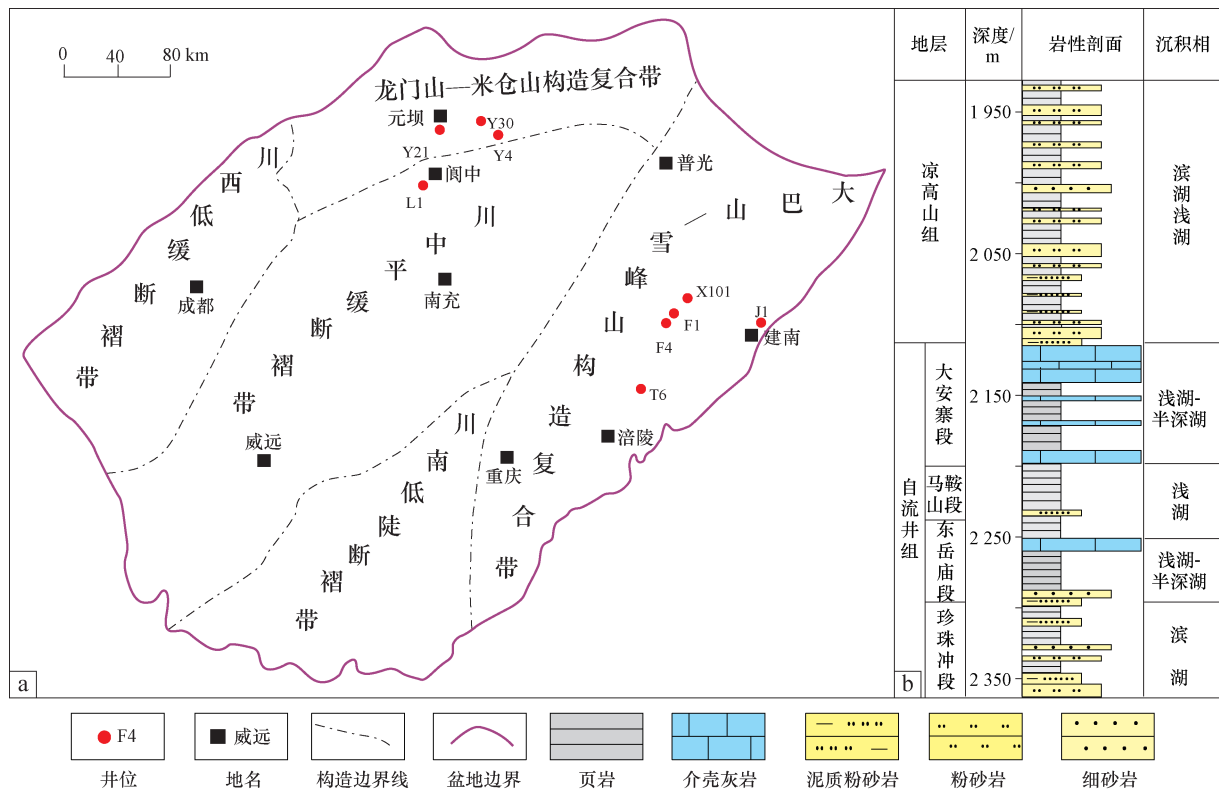


图1 川东北地区主要钻井平面位置(a)及自流井组地层柱状图(b)

Fig. 1 Locations of major boreholes (a) and stratigraphic column of the Ziliujing Formation (b) in northeastern Sichuan Basin

北元坝地区东岳庙段页岩层系以灰色-深灰色粉砂质页岩夹粉细砂岩为主,大安寨段页岩层系以深灰色-灰黑色(含介壳)粘土质页岩、含介壳粘土质页岩夹介壳灰岩、粉砂岩为主;川北元坝与川东涪陵地区东岳庙段、大安寨段富有机质页岩有机碳含量(TOC)均以分布在 $0.5\sim 2.0\%$ 为主, TOC 平均值均大于 1% ,页岩有机质类型以Ⅱ型为主,局部发育Ⅲ型,镜质体反射率(R_o)多大于 1.3% ,已进入高成熟演化阶段,以生气为主。

2 页岩物性与孔隙结构特征

2.1 页岩物性特征

研究区下侏罗统自流井组页岩整体具有低孔、低渗的特征。川东涪陵地区F1井、F4井及X101井东岳庙段($n=89$)岩心页岩样品($TOC>0.5\%$)测试统计分析结果显示,孔隙度主要分布在 $1.21\%\sim 8.37\%$,平均值为 4.13% ,其中孔隙度大于 4% 的样品占比可达 50.57% ,渗透率主要分布在 $(0.0069\sim 3.8870)\times 10^{-3}\mu m^2$,平均值为 $0.2349\times 10^{-3}\mu m^2$;川北元坝地区Y4井、Y30井等大安寨段页岩($n=165$)孔隙度主要分布在 $0.95\%\sim 8.33\%$,平均为 4.36% ,其中孔隙度大于 4% 的样品占比可达 57.58% ,渗透率主要分布

在 $(0.0008\sim 6.8030)\times 10^{-3}\mu m^2$,平均值为 $0.4005\times 10^{-3}\mu m^2$;涪陵东岳庙段和元坝大安寨段页岩孔隙度与渗透率之间均具有较好的正相关关系,反映其主要以孔隙型储层为主(图2)。涪陵东岳庙段、元坝大安寨段页岩与焦石坝地区龙马溪组孔隙度(分布范围在 $1.17\%\sim 8.61\%$,平均为 4.87%)、渗透率(平均为 $1.17\times 10^{-3}\mu m^2$)^[2]相比,孔隙度大致相当,表明陆相页岩同样具有较好的储集能力,但渗透率略差,推测主要是由于其页理发育程度不及海相页岩。

2.2 页岩孔隙结构特征

目前,在页岩孔径实验测试分析过程中,将压汞法和气体吸附法相结合,通过两种测定结果的衔接实现了全孔隙结构定量表征,已基本得到普遍认可。本次选取涪陵地区自流井组页岩样品14个(东岳庙段和大安寨段各7个)、元坝地区自流井组页岩样品21个(东岳庙段6个、大安寨段15个)开展高压压汞-吸附联合测试分析,研究结果表明涪陵地区主要以介孔($2\sim 50\text{ nm}$)为主,其次为大孔($>50\text{ nm}$),微孔($<2\text{ nm}$)含量较少,平均占比依次为 $54.5\%, 37.2\%, 8.3\%$;而元坝地区主要同样以介孔($2\sim 50\text{ nm}$)为主,但大孔($>50\text{ nm}$)和微孔($<2\text{ nm}$)含量大致相当,平均占比依次为 $55.8\%, 20.8\%, 23.4\%$ (图3)。整体来

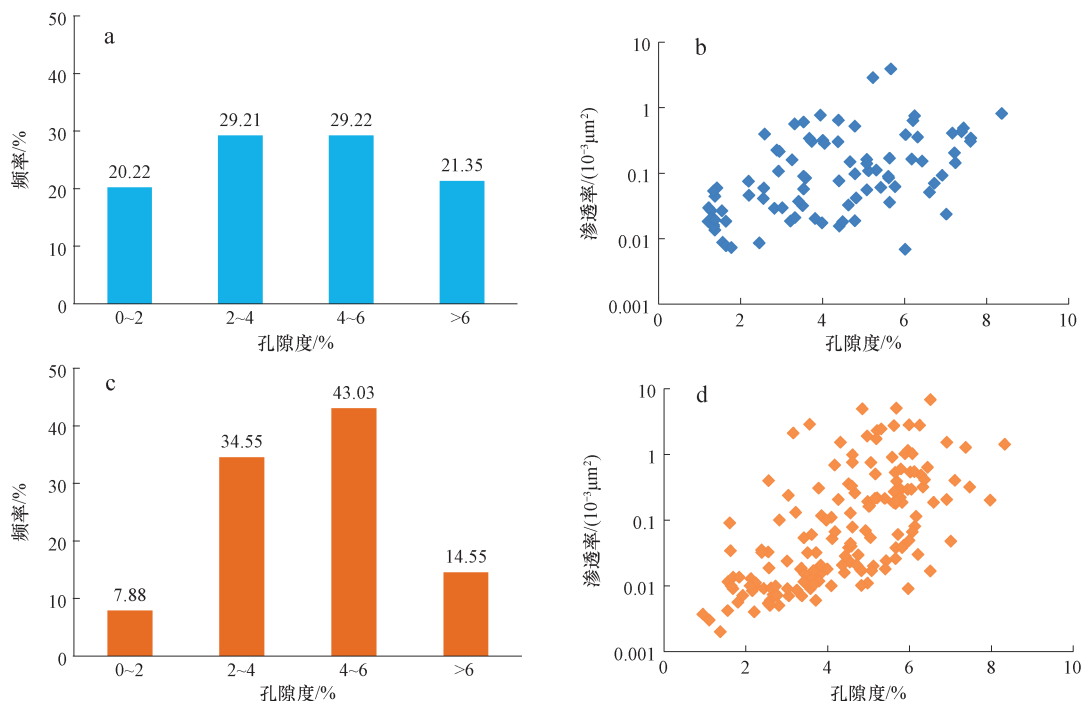


图2 川东北地区自流井组页岩储层物性特征

Fig. 2 Physical properties of the Ziliujing Formation shale reservoirs in northeastern Sichuan Basin

a. 涪陵东岳庙段孔隙度分布频率; b. 涪陵东岳庙段孔隙度与渗透率关系; c. 元坝大安寨段孔隙度分布频率; d. 元坝大安寨段孔隙度与渗透率关系

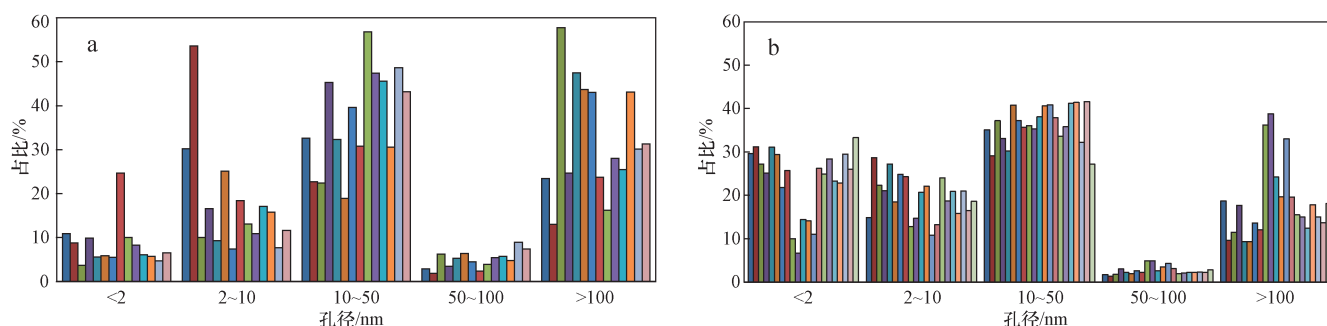


图3 川东北地区自流井组页岩孔隙孔径分布特征

Fig. 3 Pore-size distribution of the Ziliujing Formation shale in northeastern Sichuan Basin

a. 涪陵自流井组页岩孔隙各孔径占比($n=14$); b. 元坝自流井组页岩孔隙各孔径占比($n=21$)

看,涪陵、元坝地区大孔平均占比均超过20%,大孔占比的增大对陆相页岩储集能力的提高具有较大的贡献。

3 页岩孔隙类型及特征

尽管国内外不同的学者在研究过程中基于产状、结构和成因等因素提出了多种页岩储层分类方案^[9,19-20],但主体基本是在无机矿物质孔、有机质孔和微裂缝3大类基础上的进一步延伸及细分。本次研究选取研究区自流井组东岳庙段和大安寨段共计36个页岩样品,开展了氩离子抛光-扫描电镜的精细观察与鉴定分析,基于无机矿物颗粒与孔隙、有机质与孔隙、无机矿物颗粒、有机质及孔隙之间的接触与成因联系,最终将研究区自流井组页岩储层微观孔隙主要划分为3类5种孔隙类型。总体来看,页岩孔隙类型主要以无机矿物质孔(粘土矿物间线状孔和粒间孔)为主,其次为有机质孔,局部发育微裂缝(图4)。川东涪陵地区东岳庙段与大安寨段、川北元坝地区大安寨段无机矿物质孔与有机质孔均较发育,而川北元坝地区东岳庙段仅发育无机矿物质孔,有机质孔基本不发育。

3.1 无机矿物质孔

无机矿物质孔的发育,从本质上来说,与常规油气储层类似,其形成机制主要有两种情况:一类是早期粒间孔隙经历成岩压实和胶结作用后的残余孔隙;二是后期溶蚀改造作用(粒间及粒内均可发生)形成的溶蚀孔隙,此外矿物成岩蚀变过程中也可产生一些孔隙。氩离子抛光-扫描电镜观察分析表明,研究区自流井组页岩无机矿物质孔隙类型丰富,粘土矿物间线状孔、粒(晶)间孔和粒内溶蚀孔等均有发育,其中粘土矿物

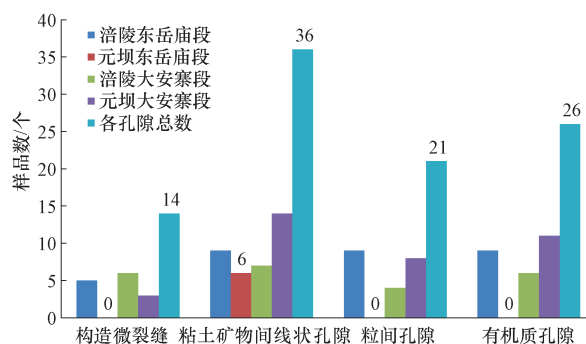


图4 川东北不同地区及层段页岩储层中各类孔隙发育频次直方图

Fig. 4 Histograms showing pore growth in various shale reservoirs in northeastern Sichuan Basin

间线状孔最发育,其次为粒间孔,局部发育碳酸盐岩粒内溶蚀孔。

3.1.1 粘土矿物间线状孔

页岩全岩矿物X-衍射分析结果显示,自流井组东岳庙段和大安寨段陆相页岩粘土矿物平均含量均接近50%,粘土矿物组成主要以伊/蒙混层、伊利石为主,其次为绿泥石和高岭石。氩离子抛光-扫描电镜观察分析显示,自流井组东岳庙段和大安寨段页岩普遍发育大量的粘土矿物间线状微孔隙(图5a,b),主要发育于伊利石片层间、伊利石与云母片层间,线状孔隙长度及宽度大小不一,受不同样品有机碳含量多少及线状孔隙发育程度的控制,孔隙被沥青全充填、半充填、部分充填及未充填均有。该类孔隙的形成是由早期粘土矿物孔隙随着埋藏深度的不断增加,在强压实作用下孔隙萎缩成线形。部分为矿物蚀变过程中形成的孔隙,如长石向伊利石或绿泥石的蚀变,该类孔隙基本沿粘土矿物解理方向发育,形成狭缝形或线形孔隙,可延伸数微米。此外,部分长石颗粒边缘发育一些粒

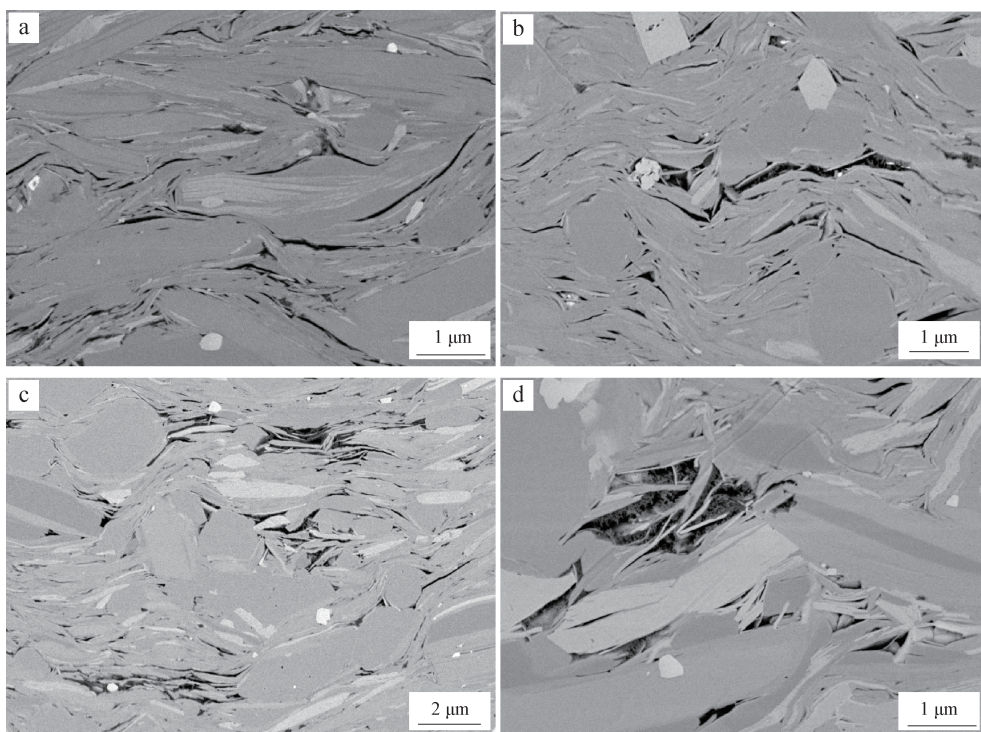


图5 川东北地区自流井组页岩无机矿物质孔发育扫描电镜显微特征

Fig. 5 SEM features of inorganic mineral pore development in the Ziliujing Formation shale in northeastern Sichuan Basin

a. 粘土矿物间线状孔隙,局部充填少量有机质,F1井,埋深2 736.3 m;b. 粘土矿物间线状孔隙,部分孔隙中充填少量有机质,X101井,埋深2 149.77 m;c. 无机矿物粒间孔隙,多呈三角形,个体较大的孔隙多被有机质半充填,X101井,埋深2 269.94 m;d. 无机矿物粒间孔隙,三角形、不规则形均有,其中个体最大的微米级孔已被有机质全充填,Y30井,埋深4 007.13 m

缘缝,其形态与线状微孔隙类似,但其形成主要以受成岩收缩作用控制为主。

3.1.2 粒间孔

粒间孔主要是指石英、长石、碳酸盐岩矿物及粘土矿物(如伊利石、绿泥石等)颗粒排列堆积、成岩压实后颗粒之间残留的原生孔隙,是页岩储层主要的储集空间类型之一。氩离子抛光-扫描电镜观察分析显示,研究区自流井组页岩中粒间孔形态多呈三角形、多边形、长条形和不规则状等,孔径范围较大,纳米级和微米级孔隙均有发育(图5c,d),且一般在同一视域下与上述粘土矿物间线状孔共存。主要发育于粘土矿物与石英颗粒或长石间、粘土矿物晶片间及局部石英颗粒间,其发育形态及形成因素明显较粘土矿物间孔隙复杂,早期较大孔径的粒间孔隙多被沥青充填,仅残存部分相对较小孔径粒间孔隙,由粘土矿物与刚性颗粒间或粘土矿物杂乱堆积形成一定抗压支撑结构而保存下来。自流井组页岩中粒间孔隙的发育程度较志留系差,其主要与其粘土矿物含量高、硅质含量低有关,且黄铁矿等能形成刚性支撑的矿物也不如志留系丰富,导致其抗压实能力相对较弱。

3.2 有机质孔

有机质孔作为页岩气储集的主要孔隙类型,对页岩气的富集至关重要。氩离子抛光-扫描电镜观察结果表明,研究区自流井组东岳庙段和大安寨段页岩中主要发育3种类型的有机质,即原生有机质(后文结合有机岩石学予以明确)、固体沥青(次生有机质)和矿物沥青基质(次生有机质),其中以固体沥青和原生有机质为主,且多同时发育,局部发育矿物沥青基质。原生有机质表现为有固定形态(条带状、块状),其内部多均质致密,不发育孔隙(图6a,b),而固体沥青及矿物沥青基质无固定形态,内部普遍发育有机质孔。

3.2.1 固体沥青内有机质孔

氩离子抛光-扫描电镜观察结果显示,这类有机质无固定形态,属于无定形体^[21],其外边界形状受早期无机矿物颗粒间孔隙形态控制,应为液态油运移充注-裂解-固化后的产物,即油后沥青,其内部普遍发育并残留大量气孔(有机质孔),孔隙形态多样,蜂窝形(图6c)、椭圆形(图6d)、不规则形及狭缝形均有发

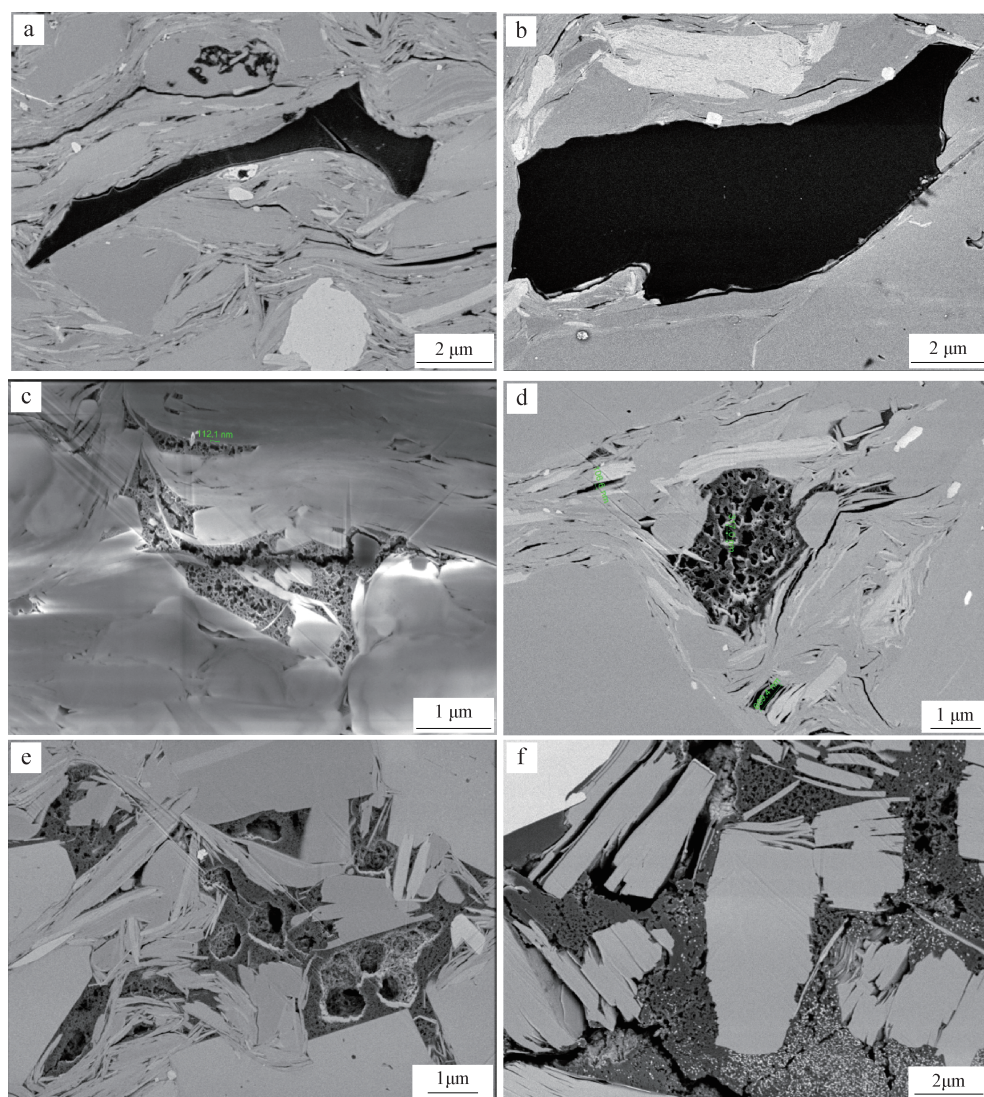


图6 川东北地区自流井组不同类型有机质中有机质孔发育扫描电镜显微特征

Fig.6 SEM features of pores developed in different types of organic matter in the Ziliujing Formation in northeastern Sichuan Basin

a. 条带状原生有机质,内部均质无孔隙发育,边缘发育微缝,F1井,埋深2 736.3 m;b. 块状原生有机质,内部均质无孔隙发育,Y30井,埋深4 004 m;c. 固体沥青内发育有机质孔隙,几十纳米为主,单孔形态不规则,整体似蜂窝状,且有机质内部见微裂缝,X101,埋深2 269.94 m;d. 固体沥青内有机质孔隙较发育,近椭圆形为主,百纳米级为主,Y4井,埋深3 786.53 m;e. 固体沥青内发育有机质孔隙,几十纳米至几百纳米不等,其中百纳米级孔多为椭圆形,F1井,埋深2 708.41 m;f. 矿物沥青基质,有机质中包裹大量书页状高岭石和粉晶磷灰石晶体,有机质纳米孔较发育,F1井,埋深2 712.96 m

育,孔径大小不一,几十纳米至几百纳米(孔径长轴)均有发育,局部样品可见微米级有机质孔与纳米级有机质孔共生发育(图6e)。从涪陵与元坝两个地区的对比分析来看,尽管川北元坝地区较川东涪陵地区埋深大,热演化程度高,但从扫描电镜下观察来看,两个地区页岩固体沥青中有机质孔发育的多少、大小差别并不明显,且绝大多数样品中发育有机质孔的固体沥青与不发育有机质孔的原生有机质是共存的,反映有机质孔的发育与否主要与有机质本身的性质有关,并不是只要热演化程度适中,页岩中所有的有机质都能发育有机质孔。

3.2.2 矿物沥青基质内有机质孔

矿物沥青基质实际上是指有机物和无机矿物的集合体,而不属于形态显微组分^[21-22]。氩离子抛光-扫描电镜下矿物沥青基质中的沥青与矿物充分混合,矿物颗粒被沥青包围。矿物沥青基质在研究区仅在个别样品中见到,发育并不普遍。观察分析认为自流井组页岩矿物沥青基质为次生成因有机质,主要为沉积早期成岩作用阶段细菌微生物降解改造作用产物及代谢产物或者被矿物吸附和结合的烃类浸染物^[21],内部有机质孔隙发育。如涪陵地区F1井东岳庙段埋深

2 712.96 m 页岩中见有机质中包裹大量书页状高岭石和粉晶磷灰石晶体,有机质内发育大量纳米级孔隙(图 6f);元坝地区 Y30 大安寨段埋深 4 009.65 m 页岩中见有机质与粘土矿物、磷灰石微晶及黄铁矿集合体,同样见较好的有机质孔发育。

3.3 微裂缝

从研究区现有钻井岩心观察情况来看,整体上自流井组页岩构造裂缝并不发育。但本次 4 口钻井 36 个页岩样品的氩离子抛光-扫描电镜的观察分析显示,有 14 个样品中发育有纳米-毫米级的微裂缝,从微裂缝与无机矿物颗粒之间切割关系来看,主要为机械成因的微裂缝,形态多呈波浪线状,且不连续,部分样品中见少量沥青充填。微裂缝具有储集页岩气及沟通各类孔隙,提高孔隙连通性的双重作用。此外,该类微裂缝的发育,对于提高粘土含量高的陆相页岩储层的压裂改造效果可能也具有一定的积极作用,从而提高页岩气产出能力。

4 页岩储层孔隙形成控制因素

从不同类型页岩岩相对 TOC 和孔隙度影响的角度研究表明,粘土质页岩、粘土质灰质页岩的 TOC 和孔隙度仍较高,而含粉砂质类页岩 TOC 和孔隙度相对均较低,反映出页岩岩相类型对于 TOC 和孔隙度的大小仍具有一定的控制作用,但同一岩相、甚至是不同层段的同一岩相其 TOC、孔隙度仍有差异,又进一步反映出自流井组页岩源、储特征的复杂性^[23]。从页岩有机碳含量(TOC)的测试分析结果来看,TOC 多分布在 0.5%~2%,即使其内部所有的有机质均发育孔隙,对于页岩孔隙度的贡献也是有限的,因此,对于自流井组

陆相页岩储层而言,无机矿物质孔应是页岩总孔隙度的最大贡献者,有机质孔次之,但有机质孔的发育与否对于评价页岩气的富集程度至关重要。因此,本次重点对不同类型孔隙(无机孔、有机质孔)发育的影响因素进行分析。

4.1 页岩粘土矿物含量及压实作用的强弱控制无机孔的发育程度

研究区自流井组陆相页岩与下志留统龙马溪组海相页岩相比,在矿物组成上存在明显差异,其表现为粘土含量更高^[23](平均值接近 50%),导致其抗压实能力变弱,且片层状粘土矿物多为定向、顺层分布,以残余粘土矿物层间线状微孔隙为主,粘土矿物间、粘土矿物与无机矿物颗粒间粒间孔虽有发育,但其孔隙数量相对少,且孔径较大的粒间孔早期多被液态油充注占据,现今以固体沥青形式存在。从川东涪陵与川北元坝两个地区对比来看,相同层段埋深差异较大,如涪陵地区 X101 井大安寨段页岩埋深介于 2 140~2 190 m、元坝地区 Y4 井大安寨段页岩埋深介于 3 700~3 800 m,也导致元坝地区较涪陵地区压实作用强。氩离子抛光-扫描电镜下两个地区同一层段相同的页岩岩相在同样放大倍数下,埋深较浅的涪陵地区粘土矿物层间线状孔隙的发育程度明显较埋深较大的元坝地区要好(图 7),也进一步证实了压实作用的差异对于无机矿物质孔发育的影响。此外,从粘土矿物含量与孔隙度的相关关系分析来看,在粘土矿物含量 35%~65% 的范围内,粘土矿物与孔隙度具有正相关关系,反映随着粘土矿物含量的增加,与其相关的无机矿物质孔会更发育,页岩总孔隙度也就越大,也可能与目前的低粘土矿物含量样品主要来源于埋深大、压实作用强烈的地区有关。

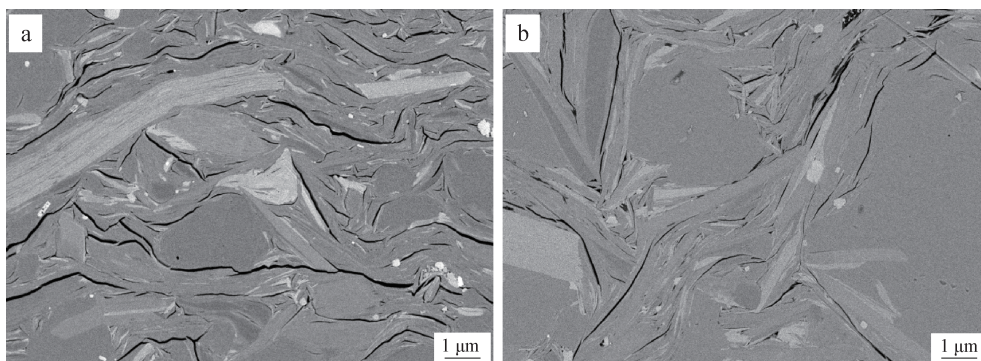


图7 川东与川北地区大安寨段粉砂质页岩粘土矿物层间孔隙发育特征

Fig. 7 Interlaminar pores in clay minerals in the Da'anzhai Member silty shale in eastern and northern Sichuan Basin

a. 川东 F1 井,埋深 2 622.76 m,粉砂质页岩;b. 川北 Y30 井,埋深 4 006.26 m,粉砂质页岩

4.2 有机质组分类型是控制有机质孔发育的关键因素

在上述页岩孔隙类型划分与识别的基础上,首先对不同有机质成熟度的页岩样品中有机质及内部有机质孔隙的发育情况进行对比分析,扫描电镜下观察发现自流井组有机质成熟度在 0.91% ~ 1.98% 范围内的页岩样品中有机质及内部孔隙发育具有如下特点: 1) 样品中有固定形态的有机质普遍发育,且内部结构致密不发育孔隙; 2) 多数样品中有固定形态的无孔有机质与无固定形态的有孔有机质同时发育,少数样品中只发育有固定形态无孔有机质; 3) 有固定形态的有机质并没有因为成熟度的提高而发育孔隙,不同成熟

度页岩中无固定形态的有机质内部普遍发育孔隙。其次在研究中发现同一样品在同一张扫描电镜照片中同时发现了无孔的与有孔的有机质(图 8a)。由此可知,对于川北-川东地区自流井组页岩有机质内孔隙发育与否,应主要受页岩中有机质组分类型的控制。

为了进一步明确页岩中有机质组分类型,本次研究选取 21 个样品开展了有机岩石学分析,鉴定结果发现自流井组东岳庙段与大安寨段页岩中显微组分包括镜质体(图 8b)、丝质体、固体沥青及微粒体,其中镜质体和丝质体各层段普遍发育,以镜质体含量最高,一般大于 50%,显微镜下镜质体多为灰色-灰白色,呈条带状、块状,表面均一。丝质体呈亮白色,有凸起。固

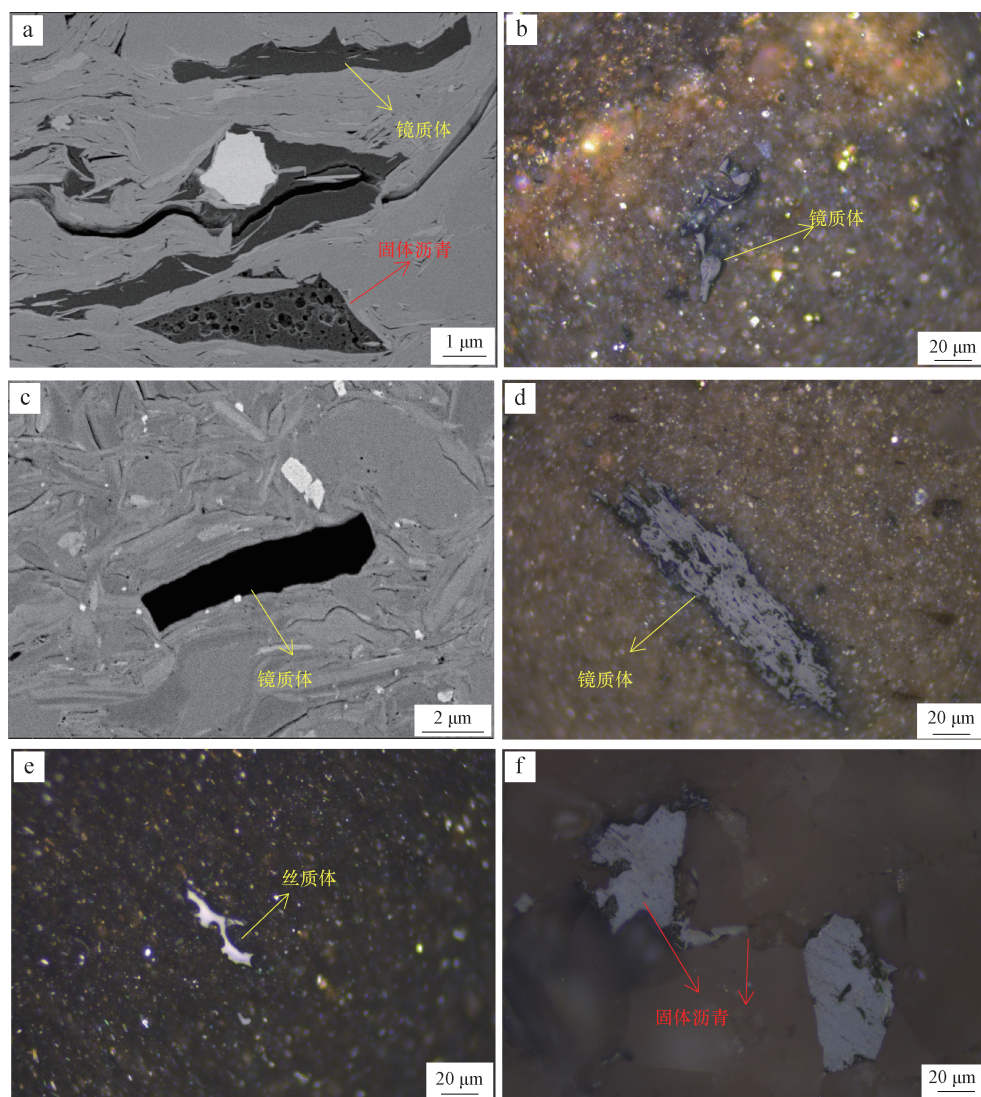


图8 川东北地区自流井组页岩不同类型有机质镜下特征

Fig. 8 Microscopic characteristics of organic matter of diverse types in the Ziliujing Formation shale in northeastern Sichuan Basin

a. 条带状镜质体内部均质无孔,固体沥青内有有机质孔较发育,F1井,埋深2 603.4 m;b. 全岩光片下镜质体,F1,埋深2 603.4 m;c. 条带状镜质体内部均质无孔,Y4井,埋深4 051.81 m;d. 全岩光片下镜质体,Y4井,埋深4 051.81 m;e. 块状镜质体内部均质无孔,Y4井,埋深4 053.9 m;f. 全岩光片下固体沥青,X101井,埋深2 155.74 m

体沥青镜下呈钢灰色,具非均质结构,无固定形态,主要沿裂缝或矿物粒间充填分布(图8f)。将有机岩石学显微组分分析与扫描电镜有机质及其内部孔隙的鉴定分析相结合,研究认为不发育孔隙的呈条带状或块状的有机质(原生有机质)主要为镜质体(图8c—e),是由高等植物的木质纤维组织经腐殖化作用和凝胶化作用而形成的显微组分^[21]。而发育有机质孔的有机质多表现为无固定形态,受原始孔隙载体(周围无机矿物)的控制,应为固体沥青,是液态油充注—裂解生气—固化后的产物,个别表现为与无机矿物充分均匀混合,为矿物沥青基质。

从不同地区、不同层段36个页岩样品的统计对比分析来看,川东涪陵地区东岳庙段和大安寨段、川北元坝地区大安寨段页岩均已同时发育镜质体、丝质体和固体沥青为主,而川北元坝地区东岳庙段以发育镜质体和丝质体为主,固体沥青基本不发育。扫描电镜下观察鉴定的结果显示,川东涪陵地区东岳庙段和大安寨段页岩中均不同程度地发育有机质孔,而川北元坝地区大安寨段页岩中发育有机质孔,东岳庙段页岩中基本不发育有机质孔。综上所述,可见对于自流井组东岳庙段与大安寨段页岩而言,固体沥青内普遍发育有机质孔,而镜质体内基本不发育有机质孔,可见有机质显微组分类型是控制有机质孔发育与否的关键,页岩中源于高等植物的镜质体、丝质体等显微组分,即使热演化程度适中,一般情况下其内部孔隙也是不发育的。因此对于四川盆地自流井组陆相页岩而言,加强不同层段中有机质类型及各显微组分占比的精细研究对于优选出有机质孔发育的页岩气富集有利层段至关重要。

5 结论

1) 研究区自流井组东岳庙段和大安寨段页岩平均孔隙度均大于4%,储集性能较好,页岩孔隙类型主要以无机矿物质孔为主,其次为有机质孔,局部发育微裂缝,无机矿物质孔对孔隙度的贡献最大。

2) 页岩粘土矿物含量及压实作用的强弱控制了无机矿物质孔的发育程度,有机质组分类型是控制有机质孔发育与否的关键因素,表现为固体沥青内普遍发育有机质孔,而大多数镜质体内基本不发育有机质孔。

3) 川东涪陵地区东岳庙段与大安寨段、川北元坝地区大安寨段无机矿物质孔与有机质孔均较发育,而川北元坝地区东岳庙段仅发育无机矿物质孔,有机质

孔基本不发育。

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 Caineng, Yang Zhi, Wang Hongyan, 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] 郭旭升,胡东风,李宇平,等. 海相和湖相页岩气富集机理分析与思考:以四川盆地龙马溪组 and 自流井组大安寨段为例[J]. 地学前缘,2016,23(2):18-28.
Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Li Yuping, et al. Analyses and thoughts on accumulation mechanisms of marine and lacustrine shale gas: A case study in shales of Longmaxi Formation and Daanzhai Section of Ziliujing Formation in Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 18-28.
- [3] 聂海宽,何治亮,刘光祥,等. 中国页岩气勘探开发现状与优选方向[J]. 中国矿业大学学报,2020,49(1):13-35.
Nie Haikuan, He Zhiliang, Liu Guangxiang, et al. Status and direction of shale gas exploration and development in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 13-35.
- [4] 聂海宽,马鑫,余川,等. 川东下侏罗统自流井组页岩储层特征及勘探潜力评价[J]. 石油与天然气地质,2017,38(3):438-447.
Nie Haikuan, Ma Xin, Yu Chuan, et al. Shale gas reservoir characteristics and its exploration potential-analysis on the Lower Jurassic shale in the eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 438-447.
- [5] 高波,刘忠宝,舒志国,等. 中上扬子地区下寒武统页岩气储层特征及勘探方向[J]. 石油与天然气地质,2020,41(2):284-294.
Gao Bo, Liu Zhongbao, Shu Zhiguo, et al. Reservoir characteristics and exploration of the Lower Cambrian shale gas in the Middle-Upper Yangtze area[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 284-294.
- [6] 汪虎,何治亮,张永贵,等. 四川盆地海相页岩储层微裂缝类型及其对储层物性影响[J]. 石油与天然气地质,2019,40(1):41-49.
Wang Hu, He Zhiliang, Zhang Yonggui, et al. Microfracture types of marine shale reservoir of Sichuan Basin and its influence on reservoir property[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1): 41-49.
- [7] 蔡振家,雷裕红,罗晓容,等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组7段页岩有机孔发育特征及其影响因素[J]. 石油与天然气地质,2020,41(2):367-379.
Cai Zhenjia, Lei Yuhong, Luo Xiaorong, et al. Characteristics and controlling factors of organic pores in the 7th member of Yanchang Formation shale in the Southeastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(2): 367-379.
- [8] 霍建峰,高健,郭小文,等. 川东地区龙马溪组页岩不同岩相孔隙结构特征及其主控因素[J]. 石油与天然气地质,2020,41(6):1162-1175.
Huo Jianfeng, Gao Jian, Guo Xiaowen, et al. Characteristics and controlling factors of pore structures of various lithofacies in shales of Longmaxi Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology,

- 2020,41(6):1162–1175.
- [9] 于炳松. 页岩气储层的特殊性及其评价思路和内容[J]. 地学前缘,2012,19(3):252–258.
Yu Bingsong. Particularity of shale gas reservoir and its evaluation. *Earth Science Frontiers*[J]. *Earth Science Frontiers*,2012,19(3):252–258.
- [10] 刘忠宝,高波,胡宗全,等. 高演化富有机质页岩储层特征及孔隙形成演化——以黔南地区下寒武统九门冲组为例[J]. 石油学报,2017,38(12):1381–1389.
Liu Zhongbao,Gao Bo,Hu Zongquan,et al. Reservoir characteristics and pores formation and evolution of high aturated organic rich shale: a case study ofin the lower Lower Cambrian Jiumenchong Formation, southern of Guizhou area[J]. *Acta Petrolei Sinica*,2017,38(12):1381–1389.
- [11] 刘忠宝,高波,武清刚,等. 页岩有机-无机复合型孔隙及其控气作用——以川西南地区筇竹寺组为例[J]. 海相油气地质,2018,23(4):42–50.
Liu Zhongbao,Gao Bo,Wu Qingzhao,et al. Organic-inorganic compound pore system and its gas-controlling significance;a case study of the Cambrian Qiongzhusi Formation in southwestern Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*,2018,23(4):42–50.
- [12] 胡宗全,杜伟,彭勇民,等. 页岩微观孔隙特征及源-储关系——以川东南地区五峰组-龙马溪组为例[J]. 石油与天然气地质. 2015,36(6):1001–1008.
Hu Zongquan,Du,Wei,Peng,Yongmin,et al. Microscopic pore characteristics and the source-reservoir relationship of shale—An example from theWufeng Formation and Longmaxi Formation in Southeast Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*,2015,36(6):1001–1008.
- [13] He Z L,Nie H K,Zhao J H,et al. Types and origin of nanoscale pores and fractures in Wufeng and Longmaxi Shale in Sichuan Basin and its periphery[J]. *Journal of Nanoscience & Nanotechnology*,2017,17:6626–6633.
- [14] Nie H K,He Z L,Jin Z J. Source rock and cap rock controls on the upper Ordovician Wufeng Formation-Lower Silurian Longmaxi Formation shale gas accumulation in the Sichuan Basin and its peripheral areas[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*,2016,90:1059–1060.
- [15] 杨智,邹才能.“进源找油”:源岩油气内涵与前景[J]. 石油勘探与开发,2019,46(1):173–184.
Yang Zhi,Zou Caineng. “Exploring petroleum inside source kitchen”: Connotation and prospects of source rock oil and gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2019,46(1):173–184.
- [16] 王香增,刘国恒,黄志龙,等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组长7段泥页岩储层特征[J]. 天然气地球科学,2015,26(7):1385–1394.
Wang Xiangzeng,Liu Guoheng,Huang Zhilong,et al. The characteristics of shale reservoir of the No. 7 members in Yanchang Formation og southeast Ordos Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*,2015,26(7):1385–1394.
- [17] 魏祥峰,黄静,李宇平,等. 元坝地区大安寨段陆相页岩气富集高产主控因素[J]. 中国地质,2014,41(3):970–981.
Wei Xiangfeng,Huang Jing,Li Yuping,et al. The main factors controlling the enrichment and high production of Daanzhai member continental shale gas in Yuanba area [J]. *Geology in China*,2014,41(3):970–981.
- [18] 高健,林良彪,任天龙,等. 川北地区下侏罗统东岳庙段页岩气富集主控因素研究[J]. 岩性油气藏,2016,28(5):67–75.
Gao Jian,Lin Liangbiao,Ren Tianlong,et al. Controlling factors for shale gas enrichment of the Lower Jurassic Dongyuemiaoj member in the northern Sichuan Basin[J]. *Lithologic reservoirs*,2016,28(5):67–75.
- [19] 李贤庆,王元,郭曼,等. 川南地区下古生界页岩气储层孔隙特征研究[J]. 天然气地球科学,2015,26(8):1464–1471.
Li Xianqing,Wang Yuan,Guo Man,et al. Pore characteristics of shale gas reservoirs from the Lower Paleozoic in the south of Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*,2015,26(8):1464–1471.
- [20] 张慧,焦淑静,庞起发,等. 中国南方早古生代页岩有机质的扫描电镜研究[J]. 石油与天然气地质,2015,36(4):675–680.
Zhang Hui,Jiang Shujing,Pang Qifa,et al. SEM observation of organic matter in the Eopaleozoic shale in South China [J]. *Oil & Gas Geology*,2015,36(4):675–680.
- [21] 焦淑静,张慧,薛东川,等. 泥页岩有机显微组分的扫描电镜形貌特征及识别方法[J]. 电子显微学报,2018,37(2):137–144.
Jiao Shujing,Zhang Hui,Xue Dongchuan,et al. Morphological structure and identify method of organic macerals of shale with SEM[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*,2018,37(2):137–144.
- [22] 唐跃刚,姜鹏,侯慧敏,等. 沥青质体和矿物沥青基质与沉积有机基质关系[J]. 中国矿业大学学报,1999,(28)1:33–36.
Tang Yuegang,Jiang Peng,Hou Huimin,et al. Correlation of Bituminite and Mineral-Bituminous Groundmass with Sedimentary Organic Groundmass[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*,1999,(28)1:33–36.
- [23] 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 Zhongbao,Liu Guangxiang,Hu Zongquan,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.

(编辑 张玉银)