

川东下侏罗统自流井组页岩储层特征及勘探潜力评价

聂海宽^{1,2,3}, 马鑫⁴, 余川⁵, 叶欣^{1,2,3}, 边瑞康^{1,2,3}, 刘忠宝^{1,2,3}

[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. 中国石化页岩油气勘探开发重点实验室, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083;
5. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042]

摘要:通过对侏罗系自流井组页岩层系的岩心和野外露头观察、薄片鉴定、氩离子抛光、扫描电镜、压汞和气体吸附等手段,研究了页岩层系的岩石类型及储层微观类型和特征。页岩层系的岩石类型以黑色页岩为主,黑色页岩储层以矿物质粒间残留孔为主,微裂缝和有机质孔发育较少,孔隙度分布在1.4%~4.9%,孔隙结构以直径小于100 nm的孔隙为主,占85%以上。与研究区海相页岩相比,陆相侏罗系页岩微观储层有机质气孔较少、孔隙度较小且孔喉直径也较小。在勘探上,考虑到侏罗系大面积和全层系油气显示以及页岩油气在个别地区的突破,建议在侏罗系页岩(烃源岩)厚度较大和成熟度较高的区域开展研究。这些地区具有较好的页岩油气形成物质基础和储集条件,在紧邻页岩的致密砂岩或灰岩也可能具有致密油气或常规圈闭油气成藏的良好条件。

关键词:无机孔;有机孔;页岩油气;自流井组;侏罗系;四川盆地

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Shale gas reservoir characteristics and its exploration potential-analysis
on the Lower Jurassic shale in the eastern Sichuan BasinNie Haikuan^{1,2,3}, Ma Xin⁴, Yu Chuan⁵, Ye Xin^{1,2,3}, Bian Ruikang^{1,2,3}, Liu Zhongbao^{1,2,3}

(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. Key Laboratory of Shale Oil/Gas Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China; 4. School of Energy, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resource, Chongqing 400042, China)

Abstract: Through core and outcrop observation, thin section examination, argon-ion milling, scanning electronic microscope and mercury data et al, this paper studied the shale rock types, Microscopic types and characteristics of the Jurassic Ziliujing Formation. The reservoirs are dominated by black shale which mainly developed interparticle pores, the micro fractures and the organic matter pores are less developed. The shale porosity is between 1.4% - 4.9% and the nanoscale micro-pores with diameter less than 100 nm account for more than 85% of total porosity. Compared with the marine shale gas reservoir in the study area, the organic matter pores are less porous and pore diameters are smaller in the Jurassic shale gas reservoir. Considering the large area and thick interval with oil/gas show of the Jurassic shale, and the success of shale oil/gas exploration in some spots, the favorable areas are suggested where the shales (source rocks) are thick and thermal maturity is high. These places may have good source charge and reservoir quality as shale oil and gas reservoirs. The tight sandstone or limestone in the vicinity of the shale may also have good possibility for hydrocarbon accumulation of tight oil or conventional reservoir.

Key words: inorganic pore, organic pore, shale oil and gas, Ziliujing Formation, Jurassic, Sichuan Basin

四川盆地侏罗系经历半个多世纪的勘探,勘探成果丰富,发现多个油气田,具有大面积分布、叠合连片、

收稿日期:2016-08-06;修订日期:2017-03-16。

第一作者简介:聂海宽(1982—),男,博士、研究员,非常规油气地质。E-mail:niehk.syky@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41202103)。

油气共生、不受构造控制、低孔低渗、资源丰度低、无明显边底水和单井产量相差悬殊等特征^[1-4]。常规油气勘探主要以寻找圈闭为主,钻井多分布在构造高部位和裂缝发育带,在勘探上主要寻找“裂缝性”常规油气藏。随着勘探的进展,认识到不能把侏罗系油层简单定性为“裂缝型”。裂缝是测试及生产初期获得高产的必要条件,但各类孔隙对储量和长期低产、稳产有重要贡献^[2],尤其是在侏罗系页岩油气勘探发现的情况下^[5-10],如川东北元坝地区侏罗系自流井组获得工业气流、川东大安寨和东岳庙段页岩油气的突破^[5-11],展示了下侏罗统页岩油气具有良好的富集条件和勘探潜力。

川东侏罗系是一套以湖泊相为主夹河流-三角洲相的碎屑岩,总厚度在1 500~4 700 m,下部与三叠系须家河组呈平行不整合接触,局部呈角度不整合接触,上部与白垩系假整合接触,包括下统自流井组,中统新田沟组、上沙溪庙组、下沙溪庙组,上统遂宁组和蓬莱镇组^[2,5]。目前页岩油气勘探研究工作主要集中在自流井组东岳庙段和大安寨段^[8-10],陆相页岩具有沉积相带变化快、砂泥互层等特点^[1,11-13],尤其在页岩储层类型和特征方面与海相页岩有较大区别,影响着页岩气的赋存方式和聚集特点^[14]。通过对川东涪陵地区兴隆101井、利川谋道和合川三汇等自流井组钻井和野外剖面观测以及测试分析等工作,研究了页岩层系的岩石类型及储层微观类型和特征,从岩石类型、储层类型和特征、孔渗大小和孔隙结构等方面对侏罗系页岩层系的储层特征进行了分析,认为侏罗系自流井组的孔隙类型主要是矿物质残留粒间孔,少量微裂缝和有机质孔,孔隙度小且孔喉直径也小,基于此认识开展了侏罗系自流井组页岩油气藏和海相上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组页岩气藏特征差异的讨论,并开展了勘探建议分析。

1 岩石类型和矿物组成

1.1 岩石类型

研究区下侏罗统页岩层系的岩性主要有页岩、泥岩、粉砂质页岩、泥质粉砂岩、砂岩和灰岩等。

1) 页岩

主要发育在东岳庙段和大安寨段,颜色有黑色、灰色、绿色、紫红色和红色等,其中黑色页岩显微镜下为显微鳞片结构,微层构造,主要矿物为粘土和石英,少量方解石、氧化铁、炭屑和黄铁矿等(图1a,b)。粘土

大部分水云母化,水云母呈鳞片状,粒度约为0.01 mm,定向分布具微层状构造。方解石为粒度小于0.03 mm的菱形体,星点较均匀分布。氧化铁粒度为0.01 mm,呈微粒密集均匀分布。炭屑粒度多小于0.10 mm,呈星点分布。黄铁矿多聚集成草莓状集合体,粒度小于0.10 mm,零星分布。陆源碎屑的石英和长石呈星点分布。

2) 泥岩

主要矿物为粘土和石英,少量方解石、陆源碎屑和炭屑等。粘土、方解石、炭屑混杂陆源碎屑分布。粘土矿物主要为隐晶质,粒度小于0.01 mm。方解石多为粒度小于0.03 mm晶粒,星点较均匀分布。碎屑颗粒主要为陆源石英粉砂,呈次棱状,粒度小于0.04 mm,星点分布。炭屑呈粒状或长屑状,粒度多小于0.05 mm,少量在0.10~0.20 mm(长径),较均匀分布。局部富集少量介屑,呈弓状或条状,粒度0.40~4.00 mm不等,由方解石组成具重结晶特征,边缘可见硅化。

3) 粉砂质泥岩

粉砂-隐晶结构,主要矿物为粘土、石英及云母碎屑等,含有机质。粘土、炭屑、石英和云母碎屑混杂有机质分布(图1d)。粘土矿物为隐晶质,部分呈鳞片状,粒度0.03~0.06 mm。碎屑颗粒主要为陆源石英粉砂,少量片状白云母,石英呈次棱状,粒度小于0.04 mm,云母粒度多在0.03~0.06 mm。炭屑呈粒状或长屑状,粒度多小于0.20 mm(长径),较密集分布,或沿长轴定向排列。有机质聚集为斑点状、条带状或微隙状分布,并浸染粘土矿物,使薄片呈褐黑色,局部可见柔褶现象。

4) 砂岩

主要为灰白色、紫色、紫红色粉砂岩、砂岩,厚度数米至数十米,平面分布稳定(图1e)。

5) 灰岩

主要发育在大安寨段顶部(图1f),局部地区夹有介壳层。这一类型的储层是目前勘探的主要层段,在兴隆101井和福石1井等取得良好效果,压裂后均获超万方天然气日产量。

1.2 矿物成分

川东下侏罗统自流井组页岩主要矿物为石英(23%~64%,平均为48.2%)、粘土矿物(25%~55%,平均为39.1%),次要矿物为长石(1%~14%,平均为5.1%,其中钾长石1%~2%,平均为1.2%)、斜长石(1%~12%,平均为4.2%)和碳酸盐岩(1%~

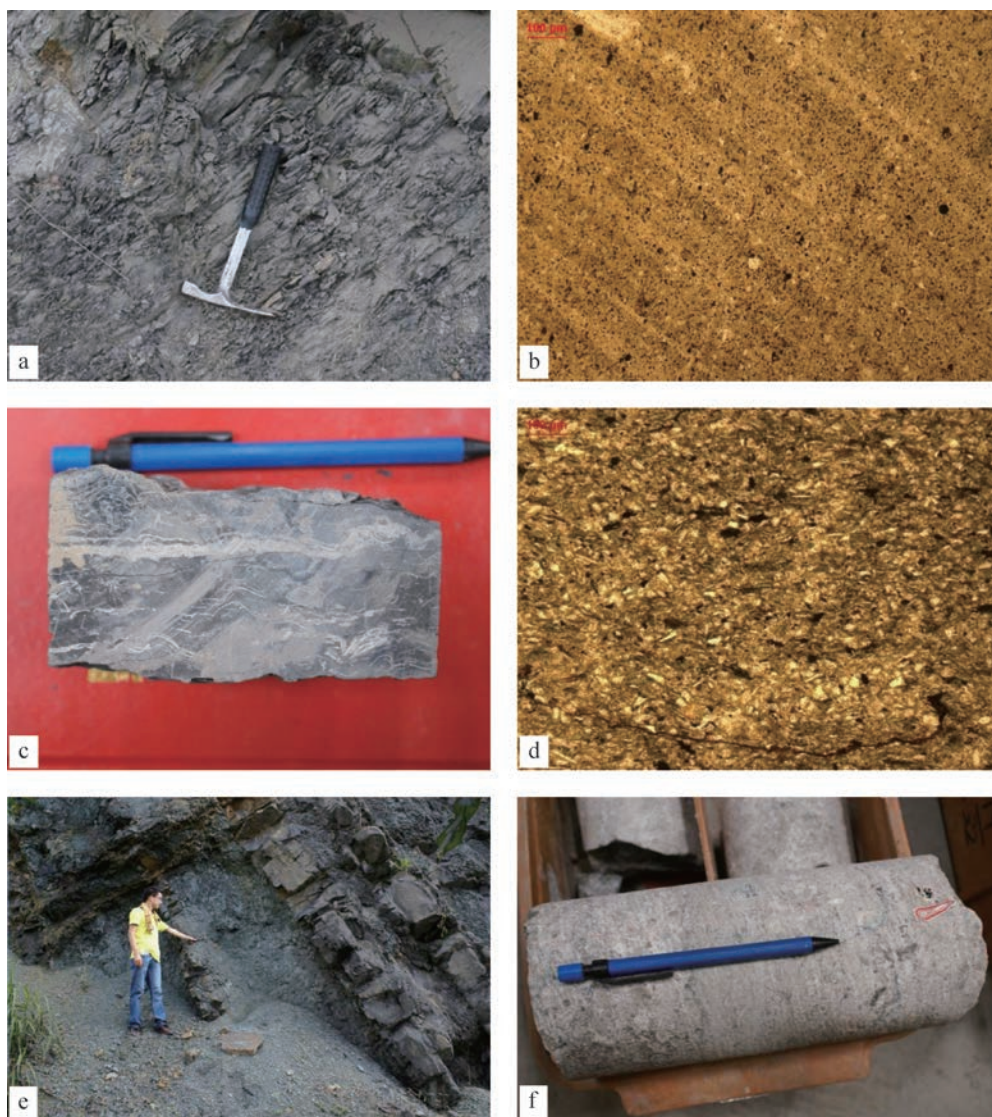


图1 鄂西-渝东地区下侏罗统自流井组页岩层系岩石类型

Fig.1 Shale rock types in the Lower Jurassic Ziliujing Formation in West Hubei-East Chongqing area

a. 自流井组东岳庙段黑色页岩,湖北省利川县谋道渝东兴隆 101 井,自流井组大安寨段,埋深 2 157.87 m;b. 自流井组东岳庙段黑色页岩,湖北省利川县谋道;c. 自流井组大安寨段介壳页岩,渝东兴隆 101 井,埋深 2 157.87 m;d. 自流井组东岳庙段粉砂质页岩,湖北省利川县谋道;e. 自流井组砂岩、泥岩互层,重庆市合川区三汇镇西;f. 自流井组大安寨段灰岩,渝东兴隆 101 井,埋深 2 127.28 m

24%,平均为 6.3%,其中方解石 1%~22%,平均 5.3%;白云石 1%~4%,平均为 2%)、菱铁矿(1%~2%,平均为 1.2%)、石膏(1%~2%,平均为 1.6%)和黄铁矿(1%~2%,平均为 1.6%)等。粘土矿物主要为伊利石和伊/蒙混层。伊利石含量在 55%~93%,平均为 75.8%,伊/蒙混层含量在 3%~30%,平均为 13.3%,高岭石和绿泥石的含量分别为 2%~20%(平均为 7%)和 1%~23%(平均为 6.9%)(图 2)。与川东焦石坝海相下志留统龙马溪组页岩气藏页岩相比,侏罗系自流井组泥页岩粘土矿物总量偏高,且低混层比的伊/蒙混层矿物含量

较高。

在纵向上,自流井组大安寨段和东岳庙段泥页岩作为烃源岩,有机碳含量高、成熟度适中,达到了生油气门限^[8],具备形成页岩油气的基本条件,并被勘探所证实。页岩层系中发育的碳酸盐岩、介壳灰岩、粉砂岩或砂岩等薄夹层,尤其是粉砂岩和砂岩等薄层较为发育,具有“近水楼台先得月”的优势,为页岩生成的油气提供了赋存空间,优先聚集油气。侏罗系自流井组页岩油气的勘探获得重要突破,对此类页岩油的储能和产能具有重要贡献。

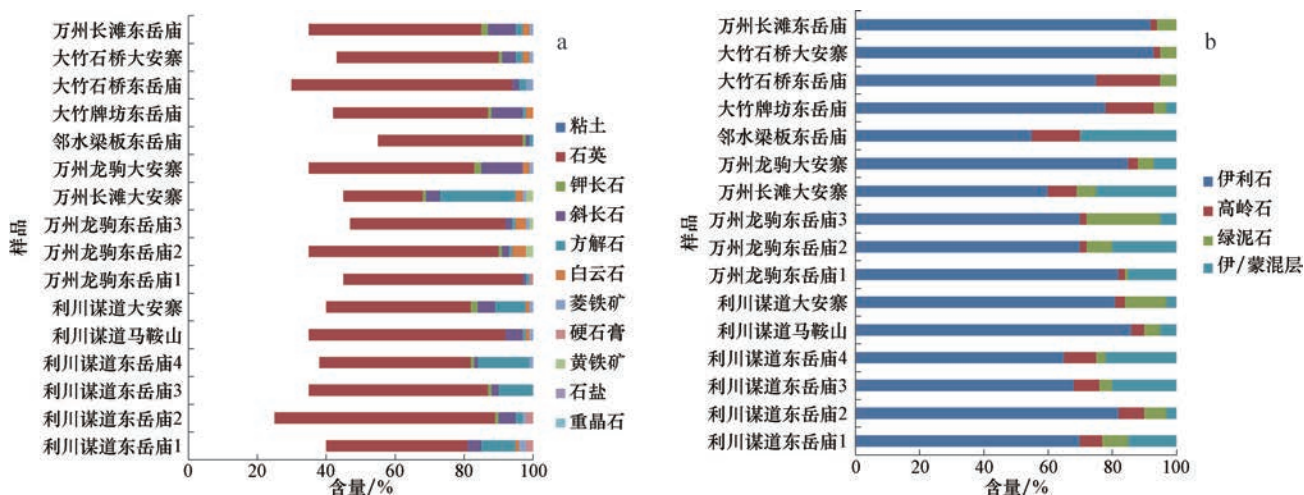


图2 鄂西-渝东地区下侏罗统自流井组页岩矿物(a)和粘土矿物组成(b)

Fig. 2 Mineral(a) and clay mineral composition(b) of the Lower Jurassic Ziliujing Formation shale in West Hubei-East Chongqing area

2 储层类型及特征

2.1 孔隙类型和特征

前人对海相页岩气储层的研究较多,进行了类型划分和特征研究^[15-19]。研究区陆相侏罗系页岩油气的储层类型和特征还处在探索阶段,前人识别出了粒间孔、粒内孔和微裂缝等储集类型^[5,8,20-21],并认为陆相页岩储层评价的标准不能简单照搬海相储层的评价标准^[22],但对孔隙特征尤其是有机质孔分析较少。通过氩离子抛光和扫描电镜分析,研究区侏罗系自流井组泥页岩的储层类型主要为矿物质孔,少量微裂缝和有机质孔。

2.1.1 矿物质孔

矿物质孔按孔隙赋存状态和发育位置可以分为粒间孔和粒内孔,按成因可以分为原生孔隙和次生孔隙。原生孔隙主要为粒间残留孔隙,次生孔隙主要为粒间溶蚀孔隙和粒内溶蚀孔隙。综合形态和成因分类,自流井组页岩的矿物质孔类型主要有粒间残留孔隙、粒间溶蚀孔隙和粒内孔隙等。

1) 粒间残留孔隙

该类孔隙主要发育在石英、长石和方解石等脆性较好、抗压实作用强的矿物颗粒间以及伊利石、高岭石、绿泥石等粘土颗粒间,呈椭圆形、三角形、长条形和不规则形等,以长条形较多,孔隙直径多分布在20~100 nm,长条形残留粒间孔的长度可达数微米(图3)。在页岩埋藏过程中,石英、长石和方解石等脆性矿物颗粒,具有一定的抗压实作用,能在压实作用和成岩作用

较强的条件下上部分保存,孔隙的形状、大小取决于矿物的成因和形成时间。粘土矿物在演化过程中,在伊利石、高岭石和蒙脱石等粘土颗粒间也能一些粒间孔隙(图3b,f)。后期压实作用和胶结物充填导致粒间孔在页岩沉积之后不断减小,并且随着页岩时代变老和埋深的增加,残留粒间孔隙也不断减小。

2) 粒间溶蚀孔隙

主要发育在方解石和长石等溶蚀性较强的矿物颗粒间,孔隙以不规则形为主,孔隙边缘不光滑,多呈港湾状,孔隙直径一般为纳米级,少数可达数微米。粒间溶蚀孔隙可被方解石和粘土等胶结物充填,减小了粒间溶蚀孔的发育程度(图3c—f)。粒间溶蚀孔发育受后期改造的影响比较大,露头样品比井下样品的溶蚀孔隙发育强,主要由于地表样品经历了大幅度抬升压力卸载、裂缝发育、地层水活跃等不利因素所致。

3) 粒内孔隙

主要发育在石英、方解石和粘土等晶形比较好、晶体粗大的矿物集合体中,多为成岩作用导致的晶格缺陷所致,形状以不规则形较多,孔隙直径较小,一般仅为数十纳米。粘土颗粒内的席状孔隙相互平行且平行于层理面,宽度一般为几十至几百纳米,长度一般为数微米。粘土颗粒在沉积时是大约平行于层理面的,因此在没有脆性颗粒干扰的情况下,位于粘土颗粒内部的席状孔隙呈平行于层理面排列(图3b,f)。这类孔隙只占页岩微观孔隙很少一部分,并且发育层位比较局限。

4) 粒内溶蚀孔隙

主要发育在方解石、长石等易溶矿物颗粒内,孔隙一般为不规则形等,孔径一般为数十至数百纳米,较大者可达数微米(图3e),和粒间溶蚀孔一样,这类孔隙

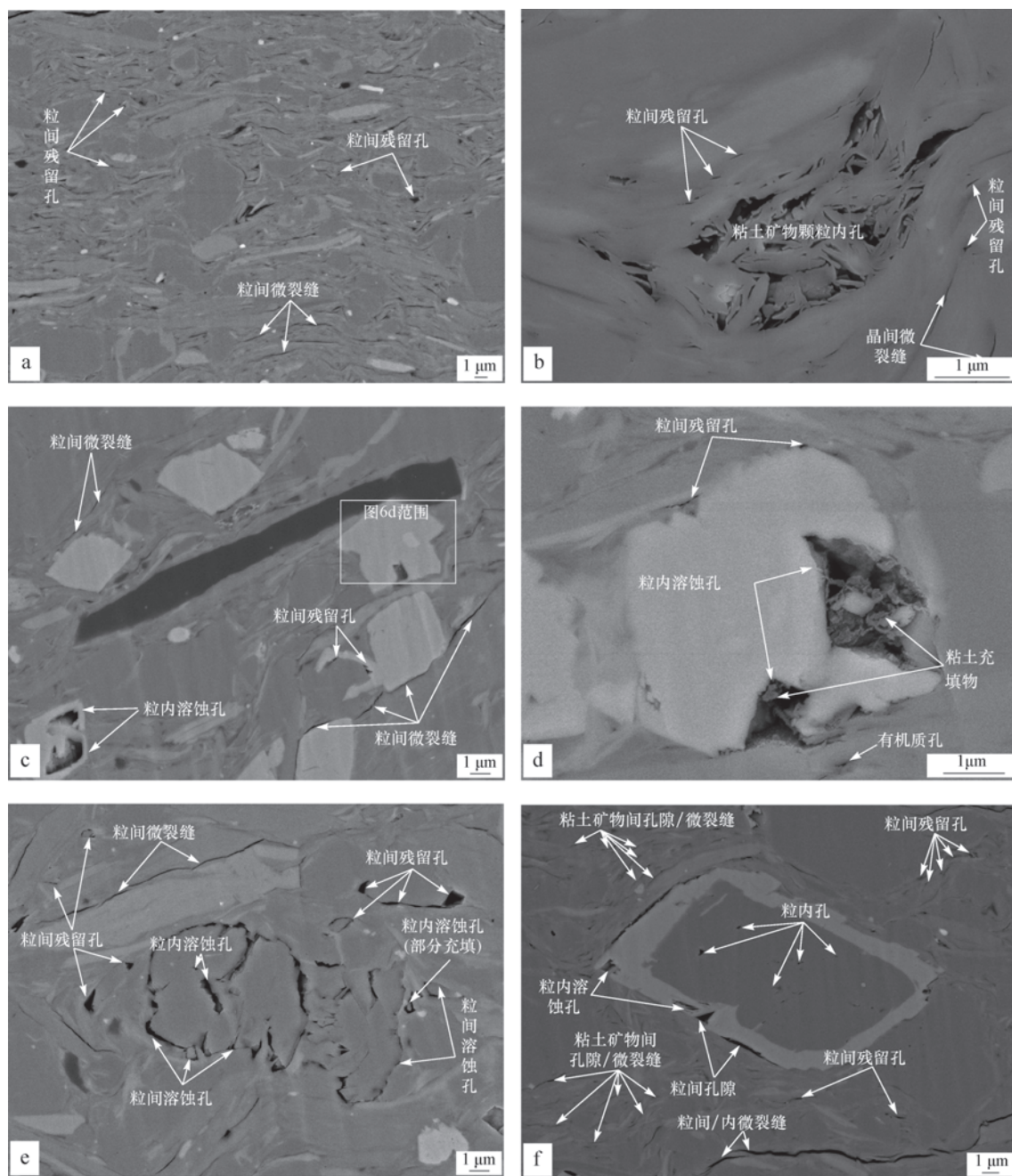


图3 渝东地区下侏罗统自流井组页岩矿物质孔

Fig. 3 Mineral micro-pores of shale in the Lower Jurassic Ziliujing Formation in East Chongqing

- a. 页岩压实强烈,发育粒间残留孔和粒间微裂缝,兴隆101井,自流井组大安寨段页岩,埋深2 153.54 m; b. 残留粒间孔、粘土矿物颗粒内孔、晶间微裂缝,兴隆101井,自流井组马鞍山段页岩,埋深2 244.67 m; c. 粒间残留孔、粒内溶蚀孔和粒间微裂缝,兴隆101井,自流井组东岳庙段页岩,埋深2 266.57 m; d. 发育粒内溶蚀孔、有机质孔、粒间残留孔,其中粒内溶蚀孔被粘土矿物充填,兴隆101井,自流井组大安寨段页岩,埋深2 146.3 m; e. 发育粒间微裂缝、粒内溶蚀孔、粒间溶蚀孔,利川谋道东岳庙段页岩; f. 发育粒内孔、粒间残留孔、粘土矿物间孔隙/微裂缝、粒间/内微裂缝,兴隆101井,自流井组马鞍山段页岩,埋深2 244.01 m

代表了地下水较为活跃,页岩层与外界有较程度的沟通。

2.1.2 微裂缝

微裂缝主要发育在脆性矿物颗粒间、颗粒内、粘土

矿物颗粒和有机质内,宽度一般仅为几十纳米,长度一般为几百纳米、几微米,个别可达几十微米(图4)。晶间微裂缝由脆性矿物颗粒的抗压实形成,发育程度随压实作用的增强而减弱。晶内微裂缝多由构造作用形成,此类裂缝发育较少。微裂缝主要发育在石英等刚

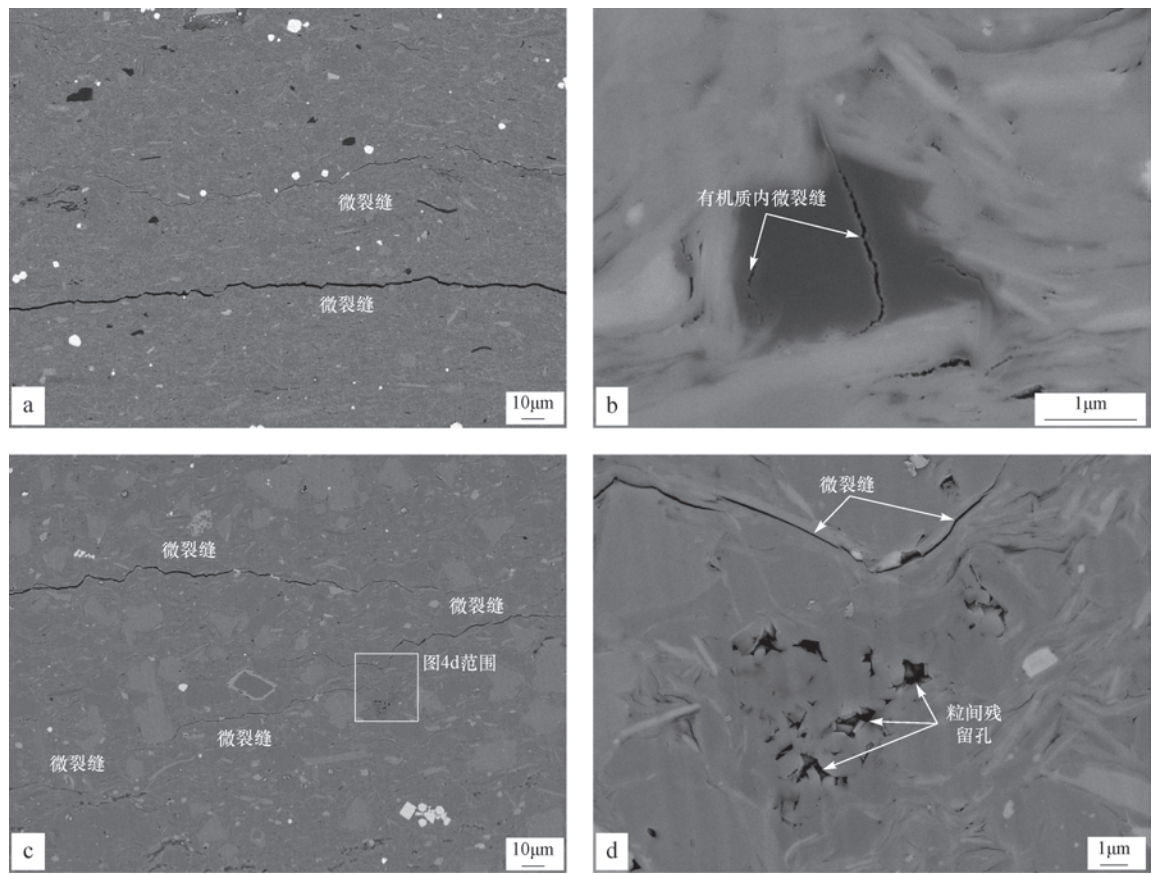


图 4 渝东地区下侏罗统自流井组页岩微裂缝

Fig. 4 Micro fractures in shale of the Lower Jurassic Ziliujing Formation in East Chongqing

a. 微裂缝, 兴隆 101 井, 自流井组大安寨段页岩, 埋深 2 153. 54 m; b. 有机质内微裂缝, 兴隆 101 井, 自流井组大安寨段页岩, 埋深 2 156. 49 m; c. 微裂缝, 兴隆 101 井, 自流井组马鞍山段页岩, 埋深 2 244. 01 m; d. 微裂缝、粒间残留孔, c 中“d 范围”白色区域放大

性矿物颗粒内,抗压实能力比较强的压实缝亦属于此类型。在宏观上,通过岩心观察,下侏罗统自流井组泥页岩天然裂缝较发育,以水平缝为主,垂直缝发育较少且被方解石充填(图 5),镜下也可见到大量微裂缝。这些裂缝的发育,有利于压裂改造和页岩油气的高效产出。

2. 1. 3 有机质孔

侏罗系自流井组泥页岩的单个有机质气孔以圆形为主,其次为椭圆形、长条形和不规则形等,轮廓清晰,边缘较光滑,有些气孔边缘弯曲,有些相邻气孔彼此连通,有些较大的椭圆形、长条形或不规则形气孔由多个

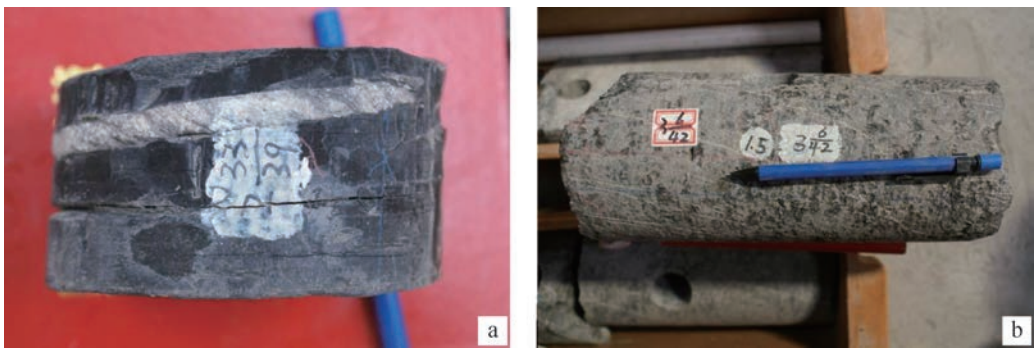


图 5 涪陵区块兴隆 101 井大安寨段页岩水平裂缝(a)和高角度裂缝(b)

Fig. 5 Horizontal fractures (a) and vertical fractures (b) of the Da'anzhai Member shale from Well Xinglong 101 in the Fuling Block

a. 埋深 2 150. 03 m; b. 埋深 2 152. 14 m

气孔破裂连通而成。该类孔隙以纳米级为主,孔隙直径多为10~500 nm(图6)。莓粒状黄铁矿通常和有机质伴生,在有机质内部形成有机质孔。有机质孔可占有机质颗粒的20%~60%。有机质表面也是重要的天然气赋存空间,天然气呈吸附态赋存在有机质表面,有机质含量和热演化程度是控制这类有机质表面的重要因素,有机质含量越高,这类比表面越发育。有机质类型和形态决定了有机质孔发育程度^[14,18],个别有机质内并不发育有机质气孔,可能和有机质类型(生烃能力差)和围岩封闭(抑制排烃,孔隙不发育)有关(图3c,图6d)。在有机质和矿物质间孔隙发育的地方,有机质气孔较发育,这些区域有机质的排烃没有受到抑制,有机质排烃顺畅,易形成较多的有机质气孔(图6a,b)。

2.2 孔隙度大小和结构

侏罗系自流井组泥页岩孔隙度分布在1.4%~4.9%,平均为3.4%(图7)。压汞和氮气吸附联合分

析表明,孔径分布范围宽,以孔径小于100 nm的孔隙为主,大孔径孔隙发育较少。利川谋道东岳庙段页岩孔隙直径小于100 nm的孔隙约占总孔隙的89.96%,其中分布在2~10 nm的小孔约占总孔隙的42.20%,分布在10~50 nm的小孔约占总孔隙的34.81%,而孔隙直径分布在100~1 000 nm的约占总孔隙的9.02%,直径大于1 μm的孔隙仅占1.03%(图8a)。利川谋道大安寨段页岩孔隙直径小于100 nm的孔隙约占总孔隙的88.35%以上,其中分布在2~10 nm的小孔约占总孔隙的53.93%,分布在10~50 nm的小孔约占总孔隙的25.98%,这两部分是该样品微观孔隙的主要分布区间,而孔隙直径分布在100~1 000 nm的约占总孔隙的8.93%,直径大于1 μm的孔隙占2.7%(图8b)。总体来说,自流井组泥页岩孔隙直径小于100 nm的孔隙约占总孔隙的85%以上,其中孔隙直径主要分布在2~10 nm,约占总孔隙的40%~50%,是该样品微观孔隙的主要分布区间,其次是分布

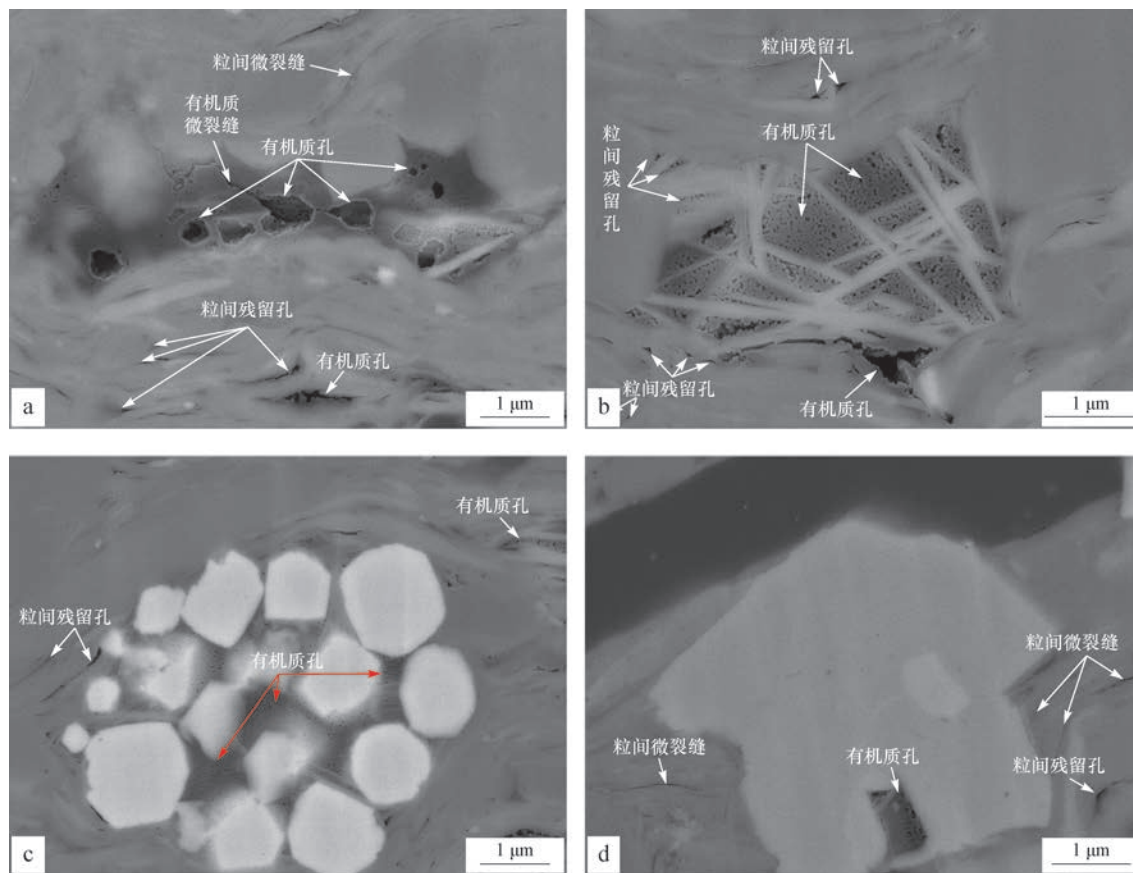


图6 渝东地区下侏罗统自流井组页岩有机质孔

Fig. 6 Organic matter micro-pores in the shale of Lower Jurassic Ziliujing Formation in East Chongqing

a. 有机质孔、粒间残留孔,兴隆101井,自流井组大安寨段页岩,埋深2 153.54 m;b. 有机质孔、粒间残留孔,兴隆101井,自流井组大安寨段页岩,埋深2 156.49 m;c. 有机质孔,发育在莓粒状黄铁矿内,粒间残留孔,兴隆101井,自流井组大安寨段页岩,埋深2 156.49 m;d. 有机质孔,粒间残留孔,兴隆101井,自流井组大安寨段页岩,埋深2 266.57 m

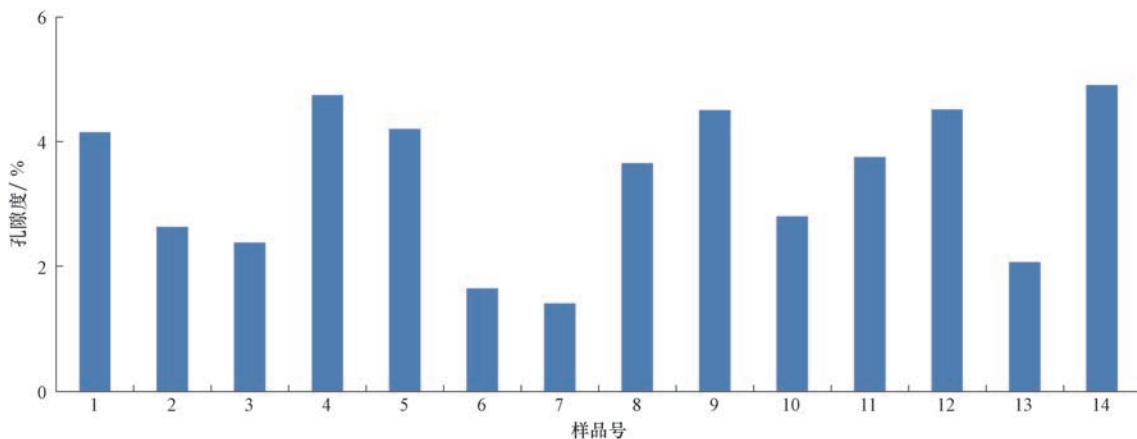


图7 鄂西渝东地区下侏罗统自流井组页岩孔隙度

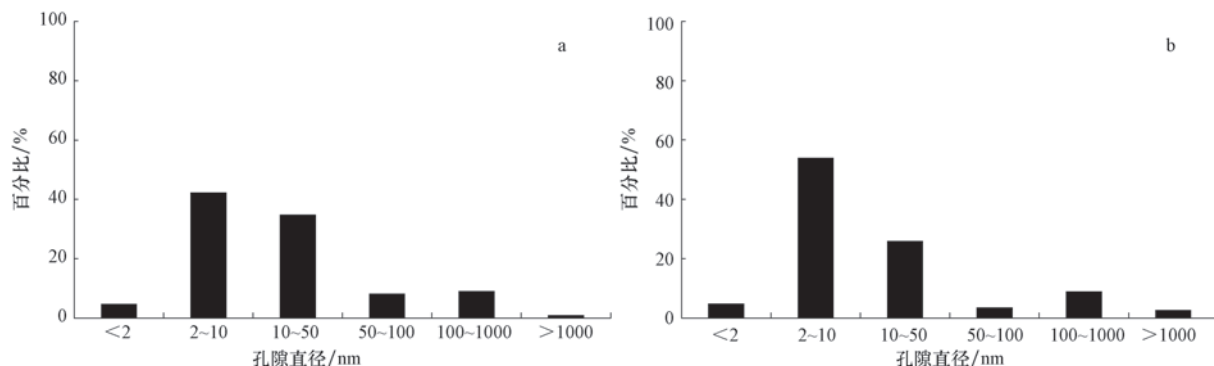
Fig. 7 Porosity of the Lower Jurassic Ziliujing Formation shale in West Hubei-East Chongqing area
(样品号为1—10的为兴隆101井下岩心样品,样品号为11—14的为露头样品。)

图8 湖北省利川谋道自流井组东岳庙段(a)和大安寨段(b)黑色页岩微孔隙结构

Fig. 8 Micro-pore structure of black shales in the Dongyuemiao Member(a) and Da'anzhai Member (b) of the Ziliujing Formation in Moudao, Lichuan, Hubei province

在10~50 nm,约占25%~35%。

3 讨论

川东地区陆相侏罗系页岩油气的勘探难度大,虽然在不同构造位置钻了很多页岩油气井并有页岩油气产出,但具有产量低、稳产差的特点,这与在侏罗系取得常规油气勘探的成果不匹配。侏罗系具有较好的页岩油气成藏条件和较大的资源潜力,但勘探效果不理想。与川东涪陵、川东南丁山地区海相龙马溪组页岩气相比,陆相侏罗系页岩油气具有如下特征。

1) 微观储层类型和特征差异

① 侏罗系自流井组页岩储层微观类型以矿物质粒间残留孔为主,微裂缝和有机质孔发育较少,而涪陵焦石坝海相龙马溪组页岩气以有机质气孔为主,矿物质残留粒间孔为辅,这点是陆相侏罗系页岩气油藏和海相龙马溪组页岩气藏的最大区别。不同成熟度研究表明,在处于生油窗的情况下,可能生成的原油没有及

时排除,导致有机质孔偏少;②与研究区海相页岩相比,陆相侏罗系页岩的孔隙度较小且孔喉直径也较小。侏罗系自流井组页岩孔隙度一般小于4%,孔隙结构以直径小于100 nm的孔隙为主,占总孔隙的85%以上,孔隙直径大于1 μm的孔隙占2%左右。海相下志留统龙马溪组页岩孔隙度一般大于4%,孔隙直径小于100 nm的孔隙直径约占80%左右,孔隙直径大于1 μm的约占5%左右^[14,18]。

2) 页岩成因及石英和有机碳含量的差异

① 侏罗系自流井组页岩为陆相沉积,沉积相带变化快,岩石类型主要黑色页岩、泥岩、粉砂质页岩、泥质粉砂岩、砂岩和灰岩等,岩石在纵向上互层明显;海相下志留统龙马溪组页岩为海相沉积,沉积相带变化不大,以黑色页岩为主,少量粉砂质页岩。②由页岩成因导致的页岩脆性矿物含量类型和特征差别较大。侏罗系自流井组页岩脆性矿物的石英主要为陆缘碎屑来源^[8],有机碳含量与石英含量成反比,与粘土矿物含量呈正比;海相下志留统龙马溪组页岩的脆性矿物石英

主要为生物成因,硅质含量和有机碳含量成正比例关系^[23],高硅和高有机碳含量是对应的,寻找高有机碳含量(对应着高有机质气孔和高含气量)发育层段,同时也是硅质等脆性矿物含量较高的层段^[14,24]。侏罗系页岩的高有机碳含量、高有机质孔和高含气量发育层段与高硅质含量的层段不是对应的,而是呈现此消彼长的关系。因此,对于陆相页岩来说,要在高有机碳含量发育层段和硅质含量之间从寻找一个最佳的匹配,既有较高的有机碳含量又有一定的压裂改造能力,足以使其中的油气运移出。

3) 有机质成熟度差异

侏罗系自流井组页岩成熟度较低,有机质成熟度(R_o ,镜质体反射率)一般小于1.2%,油气兼产,原油分子较大导致流动性较差。在川东北元坝地区等深度较大的地区,自流井组页岩成熟度较高,天然气干燥系数达0.93,天然气相对较湿,含有少量的丙烷-己烷等轻烃组分^[5];而渝东涪陵焦石坝龙马溪组页岩气藏的干燥系数高达98%,几乎不含丁烷及以上重烃。侏罗系含油以及重烃含量高,导致其含气量较低,等温吸附预测的川东北元坝地区自流井组泥页岩吸附气含量在地层状况下小于 $1\text{ m}^3/\text{t}$ ^[5],川东涪陵地区东岳庙段泥页岩现场实测含气量为 $0.87\sim 2.22\text{ m}^3/\text{t}$,平均含气量为 $1.45\text{ m}^3/\text{t}$;大安寨段页岩层段为 $1.55\sim 1.9\text{ m}^3/\text{t}$,平均为 $1.72\text{ m}^3/\text{t}$ ^[10],远低于海相页岩的 $3\sim 5\text{ m}^3/\text{t}$ 的含气量^[25]。

这3个方面的差异导致陆相侏罗系页岩油气在油气赋存特征和富集机理等方面与海相龙马溪组页岩气差别较大,陆相侏罗系页岩油气具有成熟度较低、含油率大等特征,导致页岩的有机质孔不是很发育。有机质孔作为页岩气藏区别常规油气藏的重要特征之一,其发育程度决定着页岩气藏的品质^[14,18],陆相页岩的有机质孔发育较少,以吸附态赋存的天然气较少,这可能是页岩油气井稳产时间较短的一个原因。因此,考虑到陆相页岩成熟度相对较低,页岩油气井具有油气兼产的特征^[8,13],在勘探上要寻找侏罗系页岩(烃源岩)厚度较大和成熟度较高的地区开展研究。这一地区具有较好的页岩油气形成的物质基础和良好的储集条件,具有较高的有机质孔发育程度,较轻的油气组成,较强的吸附态天然气的赋存能力,具备良好的页岩油气形成的条件,且利于油气的赋存和产出。侏罗系页岩高的有机碳含量也保证了具有较大的成烃潜力,与其紧邻的致密砂岩或灰岩也可能具有较好的致密油和常规圈闭油气成藏的良好条件。

4 结论和建议

1) 侏罗系自流井组页岩层系岩石类型主要有黑色页岩、粉砂质页岩、泥质粉砂岩、砂岩和灰岩等,在垂向上构成了良好的生储盖组合。页岩储层压实强烈,储层类型以各种矿物质粒间残留孔为主,微裂缝和有机质孔发育较少。孔隙度分布在1.4%~4.9%,平均为3.4%,在孔隙结构上,以直径小于100 nm的孔隙为主。

2) 在勘探上,考虑到侏罗系大面积和全层段的油气显示以及页岩油气在个别地区的突破,建议以侏罗系页岩(烃源岩)厚度较大和成熟度较高的地区开展研究,这一地区具有较好的页岩油气形成的物质基础和良好的储集条件,在紧邻页岩的致密砂岩或灰岩也可能具有较好的致密油气和常规圈闭油气成藏的良好条件。

参 考 文 献

- [1] 张金川,聂海宽,徐波,等.四川盆地页岩气成藏地质条件[J].天然气工业,2008,28(2):151-156.
Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [2] 梁狄刚,冉隆辉,戴弹申,等.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,2011,32(1):8-17.
Liang Di gang, Ran Longhui, Dai Danshen, et al. A re-recognition of the prospecting potential of Jurassic large-area and on-conventional oils in the central-northern Sichuan Basin. [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 8-17.
- [3] 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 Shiqian, Hu Suyun, Dong Dazhong. Jurassic tight oil & gas resources in East Sichuan Basin: A new exploration target[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(12): 22-29.
- [4] 张闻林,周肖,严玉霞,等.川中地区侏罗系适合页岩油气藏开采的地质依据[J].天然气工业,2012,32(8):117-124.
Zhang Wenlin, Zhou Xiao, Yan Yuxia, et al. Geologic evidences of the Jurassic reservoirs for the shale oil/gas recovery in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(8): 117-124.
- [5] 郭彤楼,李宇平,魏志红.四川盆地元坝地区自流井组页岩气成藏条件[J].天然气地球科学,2011,22(1):1-7.
Guo Tonglou, Li Yuping, Wei Zhihong. Reservoir forming conditions of shale gas in Ziliujing Formation of Yuanba Area in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 1-7.
- [6] 何发岐,朱彤.陆相页岩气突破和建产的有利目标——以四川盆地地下侏罗统为例[J].石油实验地质,2012,34(3):246-251.
He Faqi, Zhu Tong. Favorable targets of breakthrough and built-up of shale gas in continental facies in Lower Jurassic, Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 246-251.

- [7] 周德华,焦方正.页岩气“甜点”评价与预测——以四川盆地建南地区侏罗系为例[J].石油实验地质,2012,34(2):109-114.
Zhou Dehua, Jiao Fangzheng. Evaluation and prediction of shale gas sweet spots: A case study in Jurassic of Jiannan area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(2): 109-114.
- [8] 周德华,焦方正,郭旭升,等.川东南涪陵地区下侏罗统页岩油气地质特征[J].石油与天然气地质,2013,34(4):450-454.
Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Guo Xusheng, et al. Geological features of the Lower Jurassic shale gas play in Fuling area, the southeastern Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 450-454.
- [9] 周德华,焦方正,郭旭升,等.川东北元坝区块中下侏罗统页岩油气地质分析[J].石油实验地质,2013,35(6):596-600.
Zhou Dehua, Jiao Fangzheng, Guo Xusheng, et al. Geologic analysis of Middle-Lower Jurassic shale reservoirs in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(6): 596-600.
- [10] 王良军,王庆波.四川盆地涪陵自流井组页岩气形成条件与勘探方向[J].西北大学学报(自然科学版),2013,43(5):757-764.
Wang Liangjun, Wang Qingbo. Formation conditions and explorative directions of Jurassic shale gas in Fuling Sichuan Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2013, 43(5): 757-764.
- [11] 聂海宽,何发岐,包书景.中国页岩气地质特殊性及其勘探对策[J].天然气工业,2011,31(11):111-116.
Nie Haikuan, He Faqi, Bao Shujing. Peculiar geological characteristics of shale gas in China and its exploration countermeasures [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(11): 111-116.
- [12] 张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩油分类与评价[J].地学前缘,2012,19(5):322-331.
Zhang Jinchuan, Lin Lamei, Li Yuxi, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322-331.
- [13] 聂海宽,张培先,边瑞康.中国陆相页岩油富集特[J].地学前缘,2016,23(2):55-62.
Nie Haikuan, Zhang Peixian, Bian Ruikang. Shale oil accumulation characteristics of China continental shale [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 55-62.
- [14] Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Jiang Shengling. Types and characteristics of the Lower Silurian shale gas reservoirs in and around the Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica (English edition), 2015, 89(6): 1973-1985.
- [15] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging [J]. AAPG Bulletin, 2011, 96(4): 665-677.
- [16] Chalmers G R, Bustin R M, Power I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry, pycnometry, surface area, and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: Examples from the Barnett, Woodford, Haynesville, Marcellus, and Doig units [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1099-1119.
- [17] Loucks R G, Reed R M, Ruppel S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071-1098.
- [18] 聂海宽,边瑞康,张培先,等.川东南地区下古生界页岩储层微观类型与特征及其对含气量的影响[J].地学前缘,2014,21(4):331-343.
Nie Haikuan, Bian Ruikang, Zhang Peixian, et al. Micro-types and characteristics of shale reservoir of the Lower Paleozoic in Southeast Sichuan Basin, and their effects on the gas content [J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 331-343.
- [19] 王书彦,胡润,任东超,等.页岩孔隙成因类型及其演化发育机理——以川东南地区页岩为例[J].山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(6):9-15.
Wang Shuyan, Hu Run, Ren Dongchao, et al. Genetic types and development mechanism of shale pores—with the example of shale in southeast Sichuan [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(6): 9-15.
- [20] 王香增,高胜利,高潮.鄂尔多斯盆地南部中生界陆相页岩气地质特征[J].石油勘探与开发,2014,41(3):294-304.
Wang Xiangzeng, Gao Shengli, Gao Chao. Geological features of Mesozoic continental shale gas in south of Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 294-304.
- [21] 黄子琪,张金川,张鹏,等.东濮凹陷北部沙三段泥页岩微观储集空间特征及其主控因素[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(3):8-16.
Huang Yuqi, Zhang Jinchuan, Zhang Peng, et al. Microscopic characteristics and main controlling factors of shale reservoir space of Es3 Formation, northern Dongpu Depression [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(3): 8-16.
- [22] 罗鹏,吉利明.陆相页岩气储层特征与潜力评价[J].天然气地球科学,2013,24(5):1060-1068.
Luo Peng, Ji Liming. Reservoir characteristics and potential evaluation of continental shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 1060-1068.
- [23] 聂海宽,张金川.页岩气聚集条件及含气量计算——以四川盆地及其周缘下古生界为例[J].地质学报,2012,86(2):349-361.
Nie Haikuan, Zhang Jinchuan. Shale gas accumulation conditions and gas content calculation: A case study of Sichuan Basin and its periphery in the Lower Paleozoic [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 349-361.
- [24] 何治亮,聂海宽,张钰莹.四川盆地及其周缘奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩气富集主控因素分析[J].地学前缘,2016,23(2):8-17.
He Zhiliang, Nie Haikuan, Zhang Yuying. The main factors of shale gas enrichment of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi in Sichuan Basin and its adjacent areas [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 8-17.
- [25] 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规律[J].地学前缘,2016,23(1):1-10.
Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Regularity of shale gas in the Wufeng Formation-Longmaxi Formation, southeast Sichuan Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.