

陆相页岩源-储耦合特征及发育模式 ——以四川盆地侏罗系自流井组为例

刘忠宝^{1,2}, 胡宗全^{1,2}, 刘光祥^{1,2}, 李鹏², 王鹏威², 李倩文², 金治光³, 张哲⁴

¹页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室; ²中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院;

³中国石油化工股份有限公司勘探分公司; ⁴中国地质大学地球科学与资源学院

摘要 源-储一体是页岩储层有别于常规储层的特性,陆相富有机质页岩层系具有页岩与夹层频繁互层、夹层类型多、有机质类型多样、储层非均质性更强的特点。为查明陆相页岩源-储关系及成因,以四川盆地自流井组页岩为例,采用岩石薄片鉴定、氩离子抛光-扫描电镜鉴定、有机碳含量测定及氮气孔隙度测试等多种实验技术手段,宏观上分析源(*TOC*)、储(孔隙度)参数的相关性,微观上分析无机矿物、有机质、无机矿物孔及有机质孔(缝)之间的相互作用、相互影响。识别出了3种宏观源-储耦合类型:源-储较高相关型、源-储中等相关型、源-储弱相关型,提出有机质相关孔隙的发育程度决定了源对储贡献的大小,是源与储耦合关系的核心。将宏观-微观相结合,建立了不同岩相组合控制下的陆相页岩源-储耦合发育模式,提出源-储耦合关系的差异对页岩油气的富集程度具有重要控制作用,纯页岩型、页岩夹薄层介壳灰岩型岩相组合的源(*TOC*较高,有机质类型好)、储(有机质孔相对较多)发育条件好,源与储相关性相对较高,是陆相页岩油气富集最有利的岩相组合类型。

关键词 陆相页岩气;有机质孔;源-储耦合;自流井组;四川盆地

中图分类号:TE122.2³ **文献标识码**:A

0 前言

页岩源-储一体的特性是其内部页岩油气能够形成、赋存、富集和高产的关键。不同类型页岩中的源、储特征存在明显差异,导致页岩中源和储在静态空间配置及动态时间演化上耦合特征的多样性和复杂性^[1-4]。对四川盆地及周缘五峰组—龙马溪组海相富有机质页岩段的研究^[5-6]表明:有机质孔的大量发育对页岩储集性能及页岩气的富集高产具有重要贡献,随着页岩有机碳含量(*TOC*)增大,孔隙度也增大,体现了页岩源-储密切相关、良好配置的特性。与五峰组—龙马溪组相比,四川盆地侏罗系自流井组陆相页岩中不同程度地发育多种类型的夹层(介壳灰岩类、粉细砂岩类),由于陆源碎屑、生物介壳等的输入,导致页岩岩相组合(不同类型页岩与夹层)、页岩中矿物成分、岩相类型的多样性和复杂性^[7-8]。不同岩相组合类型在体现沉积环境差异的同时,表现出页岩内部有机显微组分、生烃

能力、有机质孔发育及油气富集能力的差异。本文以四川盆地自流井组富有机质页岩为研究对象,从分析源(*TOC*)—储(孔隙度)关键参数相互关系的复杂性入手,划分了宏观源-储耦合类型,剖析了微观源-储特征及成因机理,以期为深入探讨陆相页岩气富集规律及优选甜点区提供指导。

1 研究区地质概况

四川盆地侏罗系发育较完整,自下而上依次为下侏罗统自流井组、中侏罗统千佛崖组(凉高山组)和沙溪庙组、上侏罗统遂宁组和蓬莱镇组。下侏罗统自流井组沉积厚度一般在300~500 m之间,浅湖—半深湖相泥页岩发育广泛,自下而上可以进一步划分为4个岩性段,即珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段及大安寨段。半深湖相富有机质泥页岩主要发育于东岳庙段和大安寨段,两套富有机质页岩的*TOC*均主要分布在0.5%~2.0%之间,最高可达4.0%,平均值均大于1%;有机质类型有Ⅱ₁、Ⅱ₂及Ⅲ

收稿日期:2021-08-24; 改回日期:2021-10-25; 网络出版日期:2021-12-23

本文受国家科技重大专项课题“陆相层系页岩气勘探潜力评价”(编号:2017ZX05036-004)和中国石油化工股份有限公司科技部项目“川东北地区自流井组页岩气富集主控因素与有利目标”(编号:P19017-2)共同资助

第一作者:刘忠宝,博士,高级工程师,主要从事非常规油气地质、层序地层及碳酸盐岩沉积储层研究。通信地址:102206 北京市昌平区百沙路197号院 中国石化科学技术研究中心;E-mail:liuzb.syky@sinopec.com

型,以 II_1 、 II_2 型为主;镜质组反射率(R_o)主要介于1.1%~1.8%,已进入成熟—高成熟演化阶段,有利于页岩油气生成。

2 样品与实验分析

在岩心观察描述的基础上,重点选取川北Y4井、Y30井,川东F1井、F10井、X101井等5口典型钻井采集样品136个,重点开展了岩矿(岩石薄片、全岩矿物X衍射)、有机地球化学(TOC、有机岩石学、干酪根碳同位素、镜质组反射率)、储层(氦气孔隙度、氩离子抛光—扫描电镜)等3大类8项分析测试。所有分析测试均在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验研究中心完成,其中氩离子抛光—扫描电镜分析采用Helios650 FIB-SEM/AZtec X-MAX 50仪器,以GB/T 18295—2001、SY/T 5162—2014及SY/T 6189—2018为检测依据完成,实现了各类无机矿物、有机质及其相关孔隙的高精度表征。

3 页岩岩相特征

岩心观察、页岩全岩X射线衍射分析表明:自流

井组富有机质页岩矿物组成以黏土矿物、石英为主,黏土矿物含量高;其次为方解石及斜长石,方解石以生物介壳发育。其中,东岳庙段132个样品的黏土矿物含量平均值为49.0%,石英+长石含量平均值为41.3%,碳酸盐矿物含量平均值为10.3%;大安寨段181个样品的黏土矿物含量平均值为48.3%,石英+长石含量平均值为35.7%,碳酸盐矿物含量平均值为12.6%。为了进一步识别页岩岩相类型,首先以碳酸盐矿物、长英质矿物和黏土矿物为三端元进行全岩矿物含量岩相分区命名(图1a):以50%为边界确定岩相主名,在三角图的三个端元分别划分出页岩岩相区(I)、粉砂岩岩相区(II)及灰(云)岩岩相区(III),同时将3种组分含量均不超过50%的中间区命名为混合岩岩相区(IV)。在此基础上,以矿物含量25%为界进行二级分区,如将泥页岩岩相一级区划分为黏土质页岩相(I_1)、粉砂质页岩相(I_2)及灰质页岩相(I_3)等3个二级区。而对于混合岩岩相区,以其三角区各边界中点向中心点连线划分为3个二级分区,每个区内任意两类矿物含量之和大于70%,以这两类矿物作为前缀命名。

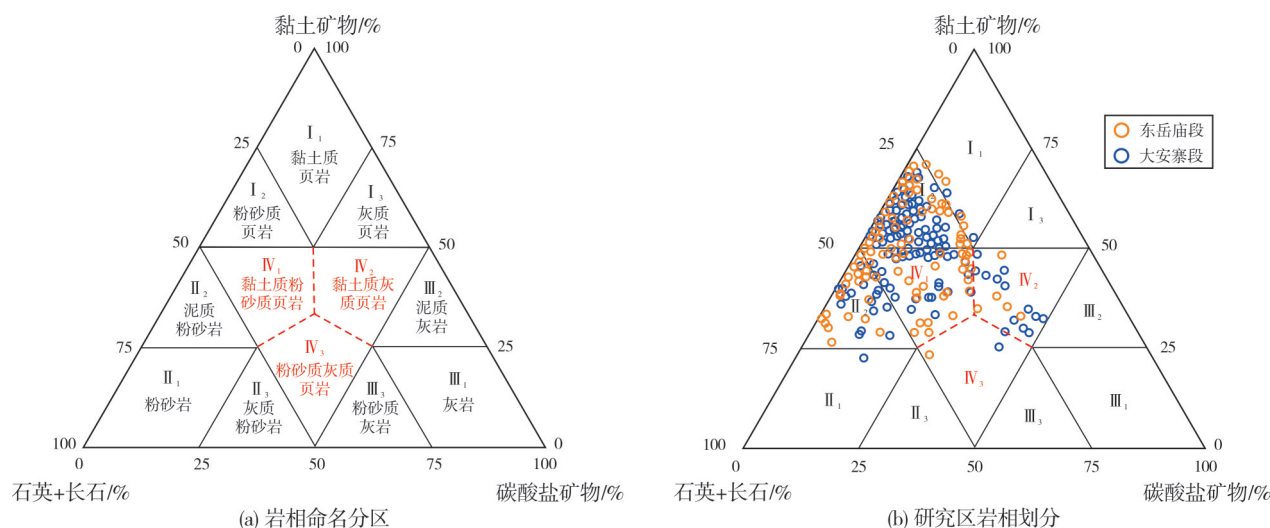


图1 四川盆地自流井组全岩矿物含量三端元岩相划分

Fig. 1 Three terminal lithofacies division of Ziliujing Formation in Sichuan Basin based on whole rock mineral content

将全岩矿物含量在岩相分区图中进行投点(图1b),结果表明研究区以发育粉砂质页岩(I_2)、黏土质粉砂质页岩(IV_1)、泥质粉砂岩(II_2)为主。但是,根据图1命名的岩相与岩心观察取得的认识存在较大差异,反映出仅依据三端元矿物进行的岩相命名存在一定的局限性。如图2a和2b,两个样品的黏土矿物含量分别为60%和54%,石英含量分别为31%

和37%,矿物组成十分接近,但图2a肉眼很难识别出明显的石英颗粒,推测主要为自生石英,而图2b则表现为粉砂泥质结构,两者在岩石薄片中的石英粒度结构差异十分明显,因此将图2b样品命名为粉砂质页岩,而将图2a、2c样品命名为黏土质页岩。此外,自流井组富有机质页岩中方解石矿物主要以生物介壳发育(图2d),在岩相命名中应有所体现,

结合全岩矿物含量,将其命名为介壳灰质页岩。

以全岩矿物含量三段元岩相划分为基础,结合非黏土矿物结构及相关沉积构造校正与完善命名^[9],对东岳庙段与大安寨段页岩层系岩相进行识别和划分。结果表明:川东地区东岳庙段与大安寨段页岩层系以深灰色—灰黑色黏土质页岩、介壳纹层状黏土质页岩夹介壳灰岩为主;而川北地区东岳

庙段页岩层系以灰色—深灰色(含)粉砂质页岩夹粉细砂岩为主,大安寨段以深灰色—灰黑色黏土质页岩、(含)介壳灰质页岩夹介壳灰岩、粉细砂岩为主。综合大量钻(录)井资料分析,自流井组主要可识别出纯页岩型、页岩夹介壳灰岩型、页岩夹粉砂岩(介壳灰岩)互层型及页岩夹粉—细砂岩型4大类岩相组合^[9]。

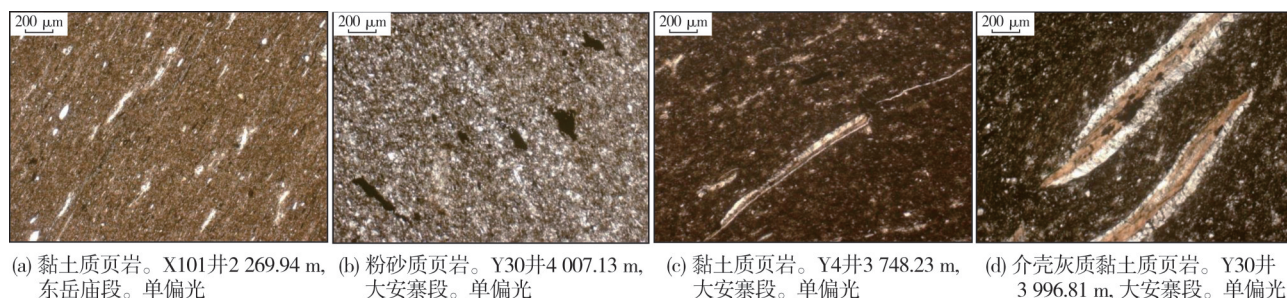


图2 四川盆地自流井组典型页岩岩相及特征

Fig. 2 Typical shale lithofacies and characteristics of Ziliujing Formation in Sichuan Basin

4 页岩源-储耦合特征及类型

4.1 宏观源-储耦合特征

四川盆地五峰组—龙马溪组海相页岩富气层段TOC主要集中在2%~4%之间,孔隙度主要分布在4%~6%之间,具有较好的源-储耦合特征,表现为源(TOC)与储(孔隙度)参数之间具有较好的正相关关系,即随着TOC的增大,孔隙度也增大^[1]。自流井组东岳庙段与大安寨段陆相页岩TOC主要集中在0.5%~2%之间,孔隙度主要分布在2%~6%之间,与五峰组—龙马溪组相比,其TOC明显偏低,孔隙度大小差异更大,源(TOC)与储(孔隙度)参数之间相关性较差(图3),反映出源-储耦合特征的复杂性。在细分页岩岩相的基础上,下文从岩相、TOC、孔隙度三者之间相互关系的角度进行分析。

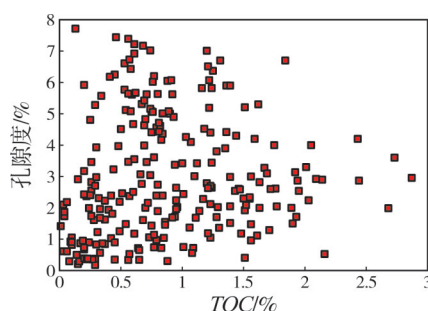


图3 四川盆地自流井组页岩TOC与孔隙度相关关系图

Fig. 3 Correlation between TOC and porosity of shale of Ziliujing Formation in Sichuan Basin

对不同岩相页岩的TOC和孔隙度进行统计(图4a,4b),可见同一岩相页岩的TOC、孔隙度变化范围也比较大:黏土质页岩TOC分布在0.10%~3.03%之间,孔隙度分布在1.01%~8.42%之间;(含)粉砂质页岩TOC分布在0.22%~1.92%之间,孔隙度分布在1.11%~5.17%之间。这反映出同一岩相的页岩其源、储特征也存在差异。但从不同页岩岩相之间的对比来看,黏土质页岩、(含)介壳灰质页岩的平均TOC与平均孔隙度均明显高于(含)粉砂质页岩,也就是说从整体上来看,黏土质页岩、(含)介壳灰质页岩具有“源”高、“储”高的特点,反映出页岩岩相类型对TOC和孔隙度具有一定的控制作用。结合沉积环境、有机质类型及储层孔隙等方面的研究,综合分析认为黏土质页岩、(含)介壳灰质页岩TOC较高,与这两类岩相发育于相对深水环境,有利于有机质富集有关;而其孔隙度高,可能主要与这两类页岩黏土矿物含量高,层间发育大量缝型孔隙,且有机质类型好,沥青质体及内部有机质孔隙相对发育有关。粉砂质页岩TOC与孔隙度略低,主要是因为其沉积水体相对浅,陆源碎屑供给多,不利于有机质富集,而且有机质以镜质组为主,有机质孔不发育;该类页岩埋深较大,压实作用强,无机孔发育也受到一定影响。因此,陆相页岩岩相类型多,以无机矿物孔为主,有机质孔为辅,有机质孔对总孔隙度的贡献相对小^[10-13],这是整体上“源”与“储”相关性弱的主要原因。

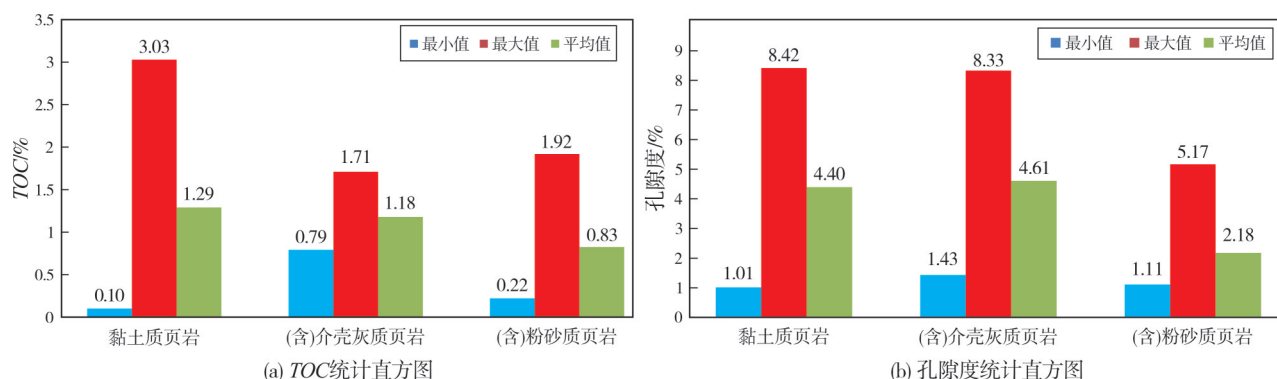


图4 不同岩相类型页岩 TOC、孔隙度对比

Fig. 4 Comparison of TOC and porosity of shale of different lithofacies types

4.2 微观源-储耦合特征

4.2.1 有机质与无机矿物之间的关系

页岩中除了各类无机矿物外,还富含有机质,有机质及有机质孔的形成演化过程与无机矿物成岩作用及无机孔的形成过程密不可分。从自流井组东岳庙段和大安寨段页岩样品的氩离子抛光-扫描电镜鉴定结果来看,有机质与无机矿物颗粒之间存在2种赋存形式:一是有机质与无机矿物互为支撑的共存结

构,这类有机质表现为有固定形态,如条带状(图5a)、块状(图5b)等,绝大多数有机质内部为致密均质状,其与各类无机矿物之间为稳定的相互支撑结构,结合有机岩石学分析,认为其主要为镜质体或丝质体,其母质主要为高等植物碎片。二是有机质赋存于无机矿物颗粒间,其形态明显受无机矿物及其形成的相关孔隙控制(图5c,5d),如粒间孔、粒内孔等可见该类有机质(固体沥青)赋存,表现为无固定形态,有机质个体大小不一,内部不同程度地发育有机质孔隙。

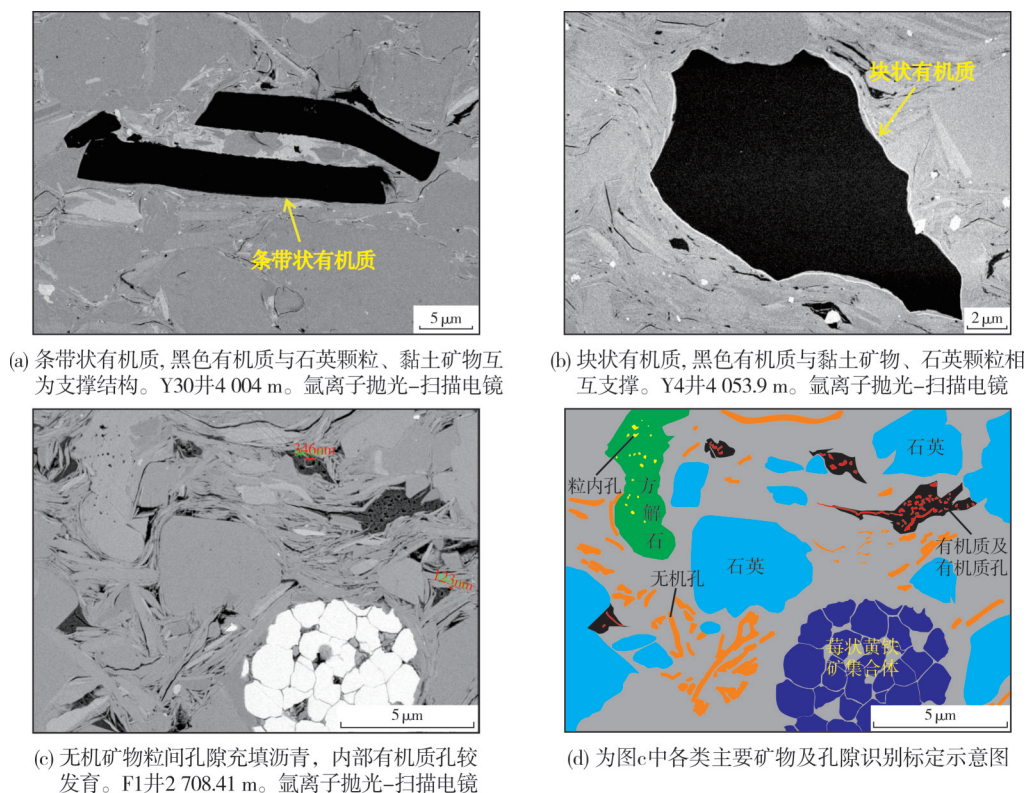


图5 不同类型有机质与无机矿物之间的关系

Fig. 5 Relationship between different types of organic matter and inorganic minerals

4.2.2 有机质孔与无机矿物孔之间的关系

页岩中有机质进入生油高峰期时,生成的液态烃会就近储存在页岩自身的无机矿物孔隙中,随着热演化程度的不断提高,液态烃发生裂解,生成天然气(形成气孔),并稠化、固结为固体沥青。在扫描电镜下观察,不同类型无机矿物孔中均可以赋存固体沥青,且沥青内部发育有机质孔,有机质与有机质孔形成源-储-一体耦合关系。主要可以分为3种类型:①主要受较大的石英颗粒(碎屑石英)形成的稳定支撑格架控制的粒间孔中,相对大个体的固体沥青得到了良好保

存,通常情况下大个体固体沥青内发育较多、较大的有机质孔(图6a)。②黏土矿物层间孔中小个体条形固体沥青,内部几十纳米至百纳米级有机质孔较发育(图6b),尽管抗压实能力弱,但黏土矿物与有机质及少量小个体自生石英颗粒共同形成的格架,在一定程度上对有机质及内部孔隙起到了支撑及保护作用。③少量方解石粒内孔中充填固体沥青,大小几百纳米不等,内部发育有机质孔,有机质孔以几十纳米为主(图6c,6d)。方解石粒内孔中有机质及有机质孔的发现,充分反映在页岩内部油气生成后,经历了近距离运移进入无机孔的过程。

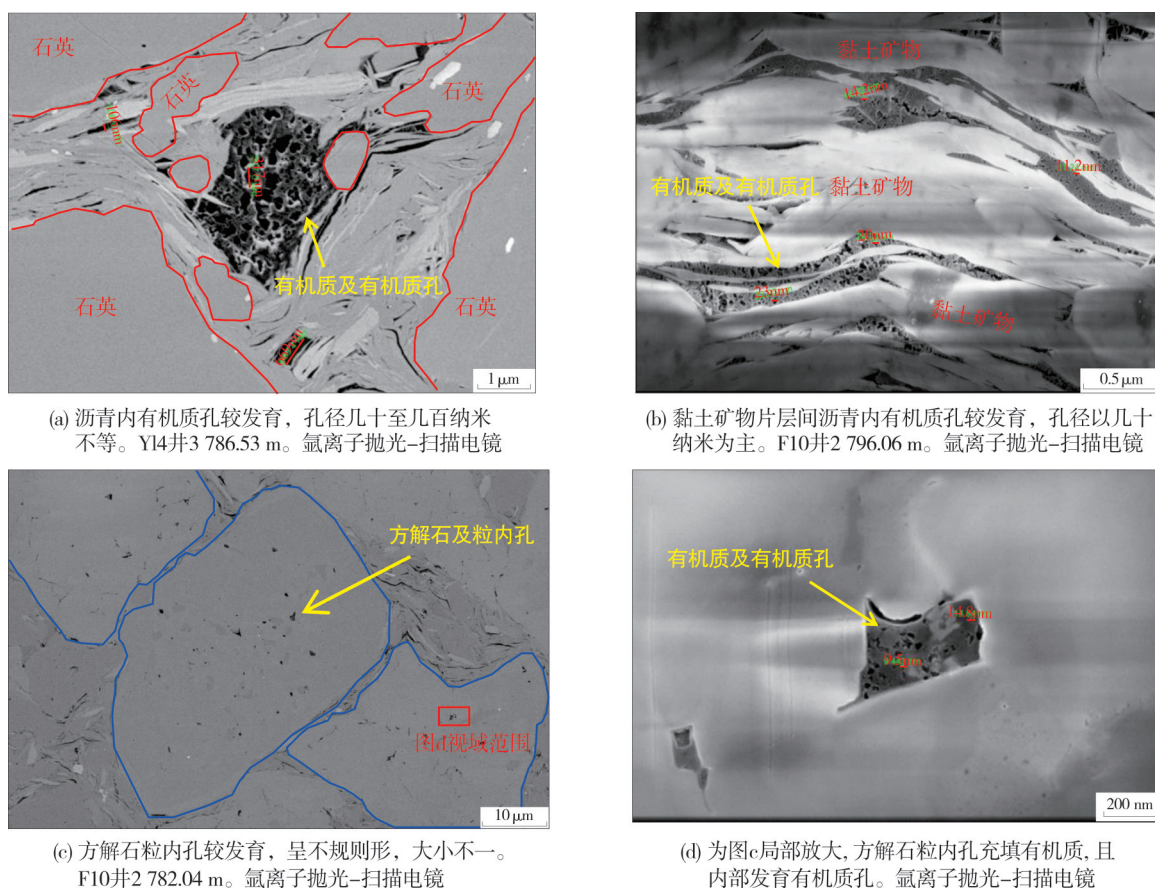


图6 不同类型无机矿物孔中有机质及内部孔隙特征

Fig. 6 Characteristics of organic matter and internal pores in pores of different types of inorganic minerals

4.2.3 有机质与微裂缝之间的关系

东岳庙段与大安寨段页岩在扫描电镜下可见一种个体相对较大的有机质,形态以条带状、枝状、块状等为主,尽管有机质内部基本不发育孔隙,但有相当一部分在边缘发育微裂缝(图7a,7b),甚至个别有机质内部也有微裂缝发育(图7c,7d)。有机质内生微裂

缝的形成,可能与有机质组分在生烃过程中局部产生异常压力(超压)导致破裂作用有关。而相对较多的有机质边缘缝主要与有机质生烃转化过程中体积收缩有关。东岳庙段与大安寨段页岩中有有机质与其边缘收缩微裂缝在页岩内部形成源储相邻的关系,这些有机质边缘缝的发育,在提高页岩储渗性能的同时,也是页岩气富集的有效储集空间。

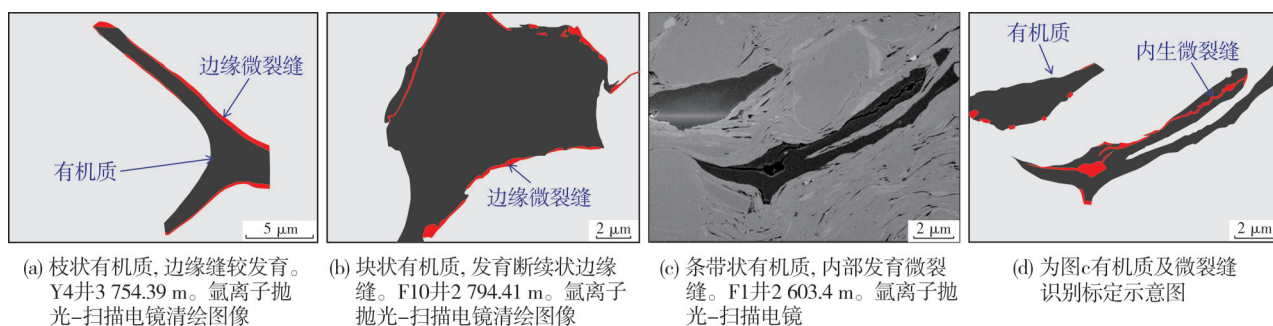


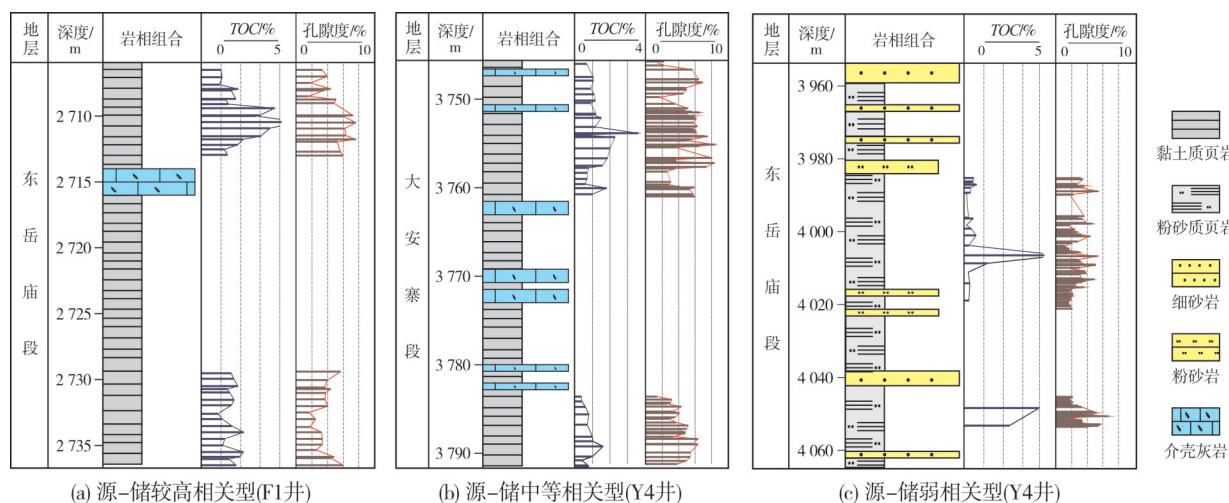
图7 有机质与微裂缝的配置关系及特征

Fig. 7 Configuration relationship and characteristics of organic matter and microcracks

4.3 页岩源-储耦合类型

陆相页岩“源”的关键评价参数 TOC 与“储”的关键评价参数孔隙度之间相关性具有一定复杂性,呈现多样性而没有统一的规律。从目前已有钻井页岩层系中 TOC 与孔隙度的关系来看,可以识别出3种源-储耦合类型:①源-储较高相关型。页岩岩相相对均一,压实程度和无机矿物孔发育程度基本相当, TOC 较高,有机质类型好,固定沥青和有机质孔相对较发育,“源”对“储”的贡献相对较大,源与

储表现出较好的正相关关系(图8a)。②源-储中等相关型。纵向上岩相及其组合类型发生变化,局部页岩段的抗压实程度及有机质类型发生变化, TOC 相对低,但整体上随着 TOC 增大有机质孔有所增多,源对储具有一定的贡献(图8b)。③源-储弱相关型。页岩中仅发育高等植物(镜质体及丝质体),局部发育极少量固体沥青,其中少量结构镜质体内部发育体腔孔,个别富氢镜质体菌化形成少量有机质孔,少量有机质边缘发育微裂缝,总体上“源”对“储”的贡献较小(图8c)。

图8 3种典型源(TOC)-储(孔隙度)关系柱状图Fig. 8 Columns showing three typical relationships between sources (TOC) and reservoir (porosity)

5 页岩源-储耦合机理及发育模式

陆相页岩层系具有3个共性特点:①介壳灰岩类、粉细砂岩类夹层的基质储集性能均较差,平均孔隙度均小于2%,铸体薄片镜下除个别见少量微裂缝外,绝大多数孔隙不发育,反映出夹层致密,储集性能明显不及页岩,对油气储集能力的直接贡献

相对有限^[14-17]。但从空间上来看,夹层厚度较薄,横向上多以透镜状不连续分布为主。②黏土矿物含量高、抗压实能力弱,以发育黏土矿物晶间孔和部分颗粒边缘缝为主,黏土矿物相关孔隙是孔隙度的主要贡献者。③从有机质组成来看,整体以镜质体、丝质体为主,其次为固体沥青(不同地区及层段含量有差异),有机显微组分类型是决定有机质孔

发育的关键,而有机质孔的发育程度是判断页岩中“源”对“储”贡献及源-储耦合关系的核心。

针对3类源-储耦合类型,为进一步从微观角度探讨其源-储耦合机理,在开展不同类型页岩、介壳灰岩、粉细砂岩的物性特征分析的基础上,以识别与划分出的不同岩相组合类型为框架,将不同岩相组合中页岩的源(*TOC*、有机岩石学特征、干酪根碳

同位素组成)、储(矿物类型,孔隙大小、形态及类型)特征进行综合分析,并在对各类主要的无机矿物、孔隙和裂缝进行刻画的基础上,重点对不同类型有机质的形貌、相对大小、内部有机质孔是否发育、是否发育边缘缝等特征进行了表征,在空间上进行组合与匹配,建立了与不同类型岩相组合相对应的源-储耦合模式(图9)。

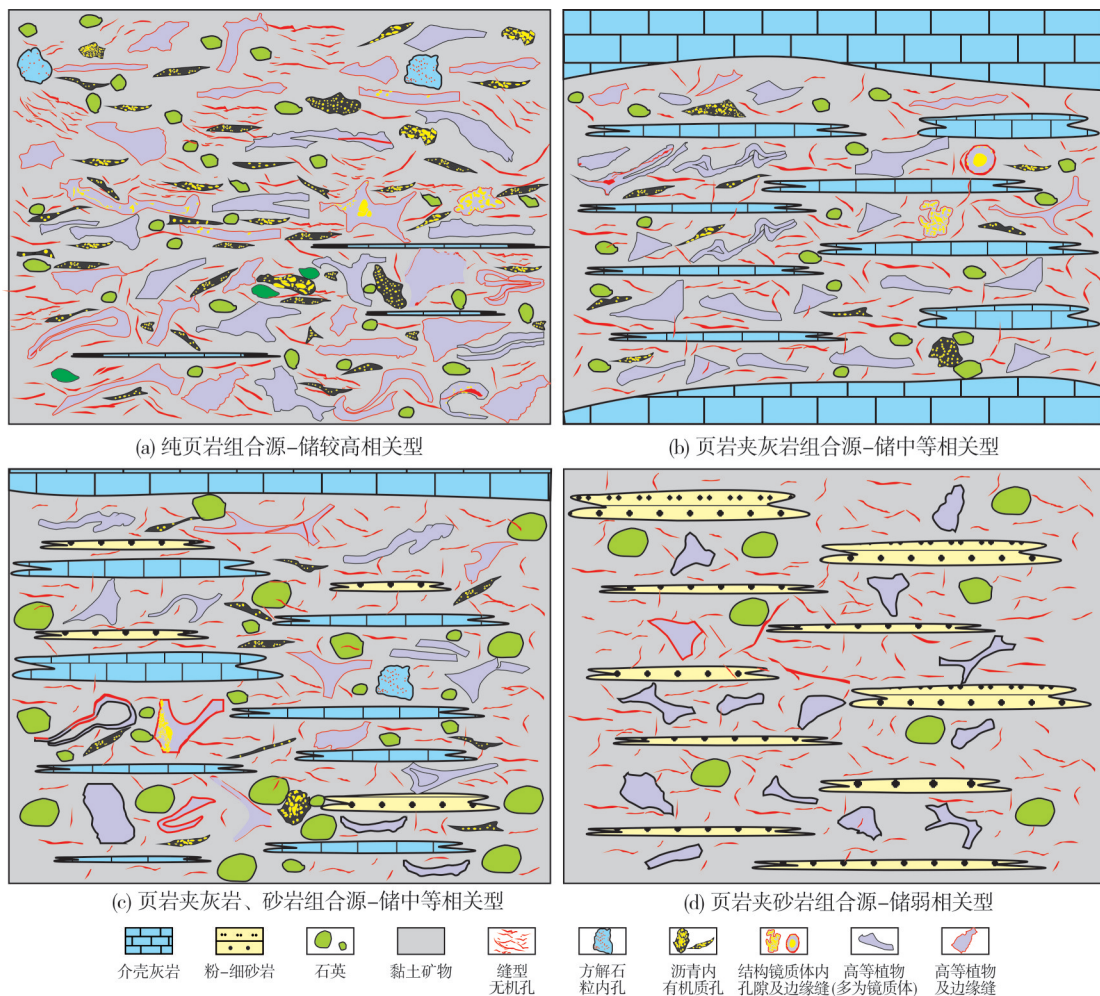


图9 陆相页岩层系中不同源-储耦合类型发育模式图

Fig. 9 Development patterns of different source-reservoir coupling types in continental shale series

纯页岩型(或局部夹少量薄层介壳灰岩)组合主要发育于静水、深水沉积环境,成烃生物相对繁盛,有机质丰度高,有机质类型好(Ⅱ型)。生油高峰期时生成的液态烃短距离运移至无机孔中保存,进入过成熟阶段后液态烃开始不断裂解生气并固化,内部形成较多的富气有机质孔,加之组成页岩的无机矿物含量基本一致,抗压实能力相当,无机矿物孔隙发育程度相当,“源”(有机质孔)对“储”的贡献相对较大,有利

于形成源-储较高相关型的耦合关系(图9a)。

页岩夹介壳灰岩型组合 主要发育于远离湖盆边缘,且较靠近生物介壳滩的相对静水、较深水沉积环境,与纯页岩型相比,水体略浅。由于风暴频繁且强度大,介壳灰岩层增多且加厚,影响成烃生物生存,造成有机质丰度略低。尽管有机质孔对于总孔隙度的贡献有所减小,但在微观尺度下仍能形成源-储一体的耦合关系(图9b)。

页岩夹粉砂岩、介壳灰岩互层型组合 主要发育于沉积物供给同时受到湖盆边缘碎屑物源和生物介壳滩共同影响的混积过渡相区。由于局部层段砂质沉积物混入,水体变浑浊,影响低等成烃生物的富集与保存,有机质类型差,生油潜力低,后期有机质孔发育较差。整体而言,该类岩相组合中“源”(有机质孔)对“储”仍具有一定的贡献(图9c)。

页岩夹粉—细砂岩型组合 主要发育于靠近湖盆边缘碎屑物源区的浅水沉积环境,整体上有有机质丰度较低,成烃生物以高等植物为主,有机质类型为Ⅲ型,除少量富氢有机质经菌化作用发育少量有机质孔外,绝大多数有机质以均质、致密为特征,不发育有机质孔。但部分有机质在生气、固化过程中可形成边缘缝,对天然气储集具有一定的贡献(图9d)。

6 讨论

我国广泛发育的陆相泥页岩层系尽管表现为盆地类型多(断陷型、坳陷型、挤压前缘型等)、层系多(中上二叠统、上三叠统、下侏罗统、白垩系和古近系),但从目前的认识来看^[3,18-19],整体上普遍存在3大共性特点:①富有机质页岩中常常发育夹层,夹层的类型主要包括粉细砂岩类、碳酸盐岩类(石灰岩、白云岩)、凝灰岩类,夹层类型可以是其中一种或者多种。如鄂尔多斯盆地三叠系延长组以页岩夹砂岩、凝灰岩为主;渤海湾盆地古近系沙河街组以页岩夹薄层—纹层砂岩和石灰岩为主;准噶尔盆地二叠系芦草沟组页岩夹粉砂岩、白云岩、凝灰岩。②页岩有机质类型多样,多为两种以上。如松辽盆地白垩系泉头组和青山口组、渤海湾盆地古近系沙河街组有机质类型均以Ⅰ、Ⅱ型为主;柴达木盆地古近系下干柴沟组页岩中Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ型有机质均发育。③页岩储集空间以无机孔为主,有机质孔相对欠发育或不发育。而本文研究以四川盆地自流井组页岩层系为例,对于陆相页岩源—储耦合机理的阐述及发育模式的建立,正是主要源于上述3个方面的核心要素。因此,基于岩相组合—有机质类型及显微组分差异建立陆相页岩层系中不同源—储耦合类型发育模式,对于开展我国陆相泥页岩层系页岩油气研究具有较好的借鉴意义。

目前针对我国鄂尔多斯、松辽、渤海湾、准噶尔、四川等大型盆地陆相层系均已开展了研究和实

际钻探工作^[20-22],从页岩油气富集有利层段(甜点层)的发育情况来看,仍然存在较大的差异,需要具体分析 and 研究。鄂尔多斯盆地长7、准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组、渤海湾盆地孔店组二段、三塘湖盆地马朗凹陷条湖组等主要以砂质、灰质、白云质及凝灰质等夹层为有利层段^[20]。2020年,中国石化针对川东复兴地区东岳庙段④小层纯页岩型源—储较高相关型组合层段部署实施的涪页10HF井测试日产气 $5.58 \times 10^4 \text{ m}^3$,日产油 17.6 m^3 ,取得了该区陆相页岩油气勘探的重大突破^[21]。松辽盆地古页油平1井以青白口组一段下部页理型页岩为甜点靶层,获得日产油30.5 t、日产气 $13\,032 \text{ m}^3$ 的高产工业油气流^[22],也是纯页岩型层段油气富集的实例。

7 结论

(1)四川盆地侏罗系自流井组陆相页岩层系源(TOC)—储(孔隙度)参数相关关系较为复杂,但黏土质页岩、(含)介壳灰质页岩具有“源”高、“储”高的特点,反映出页岩岩相类型对于TOC和孔隙度的大小具有一定的控制作用。

(2)在自流井组页岩层系中可识别出源—储较高相关型、源—储中等相关型、源—储弱相关型3种宏观源—储耦合类型。有机质显微组分类型是决定有机质孔发育的关键,而有机质孔的发育程度是判断页岩中“源”对“储”贡献及源—储耦合关系的核心。

(3)建立了不同岩相组合控制下的4种陆相页岩源—储耦合发育模式,提出源—储耦合关系的差异对页岩油气的富集程度具有重要控制作用,其中纯页岩型、页岩夹薄层介壳灰岩型岩相组合的源(TOC)较高,有机质类型好、储(有机质孔相对较多)发育条件好,源与储相关性最佳,有利于页岩油气富集。

致谢:中国石油化工股份有限公司江汉油田分公司、勘探分公司相关领导及同事在资料上给予了大力支持,在此表示感谢!

参考文献

- [1] 胡宗全, 杜伟, 刘忠宝, 等. 页岩气源储耦合机理及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2018: 1-115.
HU Zongquan, DU Wei, LIU Zhongbao. Source reservoir coupling mechanism of shale gas and its application[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018: 1-115.
- [2] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗?[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451-458.

- JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution? [J]. *Oil & gas geology*, 2019, 40(3): 451-458.
- [3] 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.
- [4] 赵文智, 朱如凯, 胡素云, 等. 陆相富有机质页岩与泥岩的成藏差异及其在页岩油评价中的意义 [J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(6): 1079-1089.
- ZHAO Wenzhi, ZHU Rukai, HU Suyun, et al. Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation [J]. *Petroleum exploration and development*, 2020, 47(6): 1079-1089.
- [5] 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: a case study from the Wufeng and Longmaxi Formations in Southeast Sichuan Basin [J]. *Oil & gas geology*, 2015, 36(6): 1001-1008.
- [6] 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和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.
- [7] 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 Zongquan, WANG Ruyue, LIU Zhongbao, 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 周德华, 孙川翔, 刘忠宝, 等. 川东北地区大安寨段陆相页岩气藏地质特征 [J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(5): 32-42.
- ZHOU Dehua, SUN Chuanxiang, LIU Zhongbao, et al. Geological characteristics of continental shale gas reservoir in the Jurassic Daanzhai Member in the Northeastern Sichuan Basin [J]. *China petroleum exploration*, 2020, 25(5): 32-42.
- [11] 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.
- [12] 刘皓天, 李雄, 万云强, 等. 陆相页岩气形成条件及勘探开发潜力: 以川东涪陵北地区侏罗系东岳庙段为例 [J]. *海相油气地质*, 2020, 25(2): 148-154.
- LIU Haotian, LI Xiong, WAN Yunqiang, et al. Formation conditions and exploration and development potential of continental shale gas: a case of Dongyemiao Member of the Jurassic in north Fuling area, Eastern Sichuan Basin [J]. *Marine origin petroleum geology*, 2020, 25(2): 148-154.
- [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 Zhongbao, HU Zongquan, LIU Guangxiang, et al. Pore characteristics and controlling factors of continental shale reservoirs in the Lower Jurassic Ziliujing Formation, Northeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & gas geology*, 2021, 42(1): 136-145.
- [14] 黄江庆, 梁榜, 车世琦, 等. 鄂西渝东地区东岳庙段陆相页岩气富集主控因素分析 [J]. *石油天然气学报*, 2014, 36(4): 30-33.
- HUANG Jiangqing, LIANG Bang, CHE Shiqi, et al. The main factors controlling the continental shale gas accumulation in Dongyemiao Section of western Hubei-eastern Chongqing area [J]. *Journal of oil and gas technology*, 2014, 36(4): 30-33.
- [15] 李延钧, 冯媛媛, 刘欢, 等. 四川盆地湖相页岩气地质特征与资源潜力 [J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(4): 423-428.
- LI Yanjun, FENG Yuanyuan, LIU Huan, et al. Geological characteristics and resource potential of lacustrine shale gas in the Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum exploration and development*, 2013, 40(4): 423-428.
- [16] 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, 656.
- ZHOU Dehua, JIAO Fangzheng, GUO Xusheng, et al. Geological analysis of Middle-Lower Jurassic shale reservoirs in Yuanba area, northeastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum geology & experiment*, 2013, 35(6): 596-600, 656.
- [17] 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.
- [18] 金之钧, 王冠平, 刘光祥, 等. 中国陆相页岩油研究进展与关键科学问题[J]. 石油学报, 2021, 42(7): 821–835.
- JIN Zhijun, WANG Guanping, LIU Guangxiang, et al. Research progress and key scientific issues of continental shale oil in China[J]. Acta petrolei sinica, 2021, 42(7): 821–835.
- [19] 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.
- [20] 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 Fangzheng, ZOU Caineng, YANG Zhi. Geological theory and exploration & development practice of hydrocarbon accumulation inside continental source kitchens [J]. Petroleum exploration and development, 2020, 47(6): 1067–1078.
- [21] 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 Zhiguo, ZHOU Lin, LI Xiong, 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.
- [22] 孙龙德, 刘合, 何文渊, 等. 大庆古龙页岩油重大科学问题与研究路径探析[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 453–463.
- SUN Longde, LIU He, HE Wenyuan, et al. An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong Shale Oil in Daqing Oilfield, NE China [J]. Petroleum exploration and development, 2021, 48(3): 453–463.

编辑:张润合

Source–reservoir coupling characteristics and development model of continental shale: taking the Jurassic Ziliujing Formation in Sichuan Basin as an example

LIU Zhongbao, HU Zongquan, LIU Guangxiang, LI Peng, WANG Pengwei, LI Qianwen, JIN Zhiguang, ZHANG Zhe

Abstract: The integration of source and reservoir is the characteristic that shale reservoir is different from conventional reservoir. Continental organic-rich shale system has the characteristics of frequent interbedding between shale and interlayer, various types of interlayer, various types of organic matter and stronger reservoir heterogeneity. In order to find out the source–reservoir relationship of continental shale and its genesis, taking the shale of the Jurassic Ziliujing Formation in Sichuan Basin as an example, various experimental technical means such as rock thin section identification, argon ion polishing scanning electron microscope identification, organic carbon content determination and helium porosity test are used to analyze the correlation of source (*TOC*)–reservoir (porosity) parameters macroscopically, and interaction among inorganic minerals, organic matter, inorganic pores and organic pores (seams) microscopically. Three macro source–reservoir coupling types are identified: source–reservoir high correlation type, source–reservoir medium correlation type and source–reservoir weak correlation type. It is proposed that the development degree of organic matter-related pores determines the contribution of source to reservoir, which is the core of source–reservoir coupling relationship. Combining macro and micro characteristics, the source–reservoir coupling development model of continental shale under the control of different lithofacies assemblages is established. It is proposed that the difference of source–reservoir coupling relationship plays an important role in controlling the enrichment degree of shale oil and gas. Pure shale type and shale intercalated thin-layer shell limestone type have good development conditions of source (high *TOC*, favorable organic matter type) and reservoir (there are relatively many organic matter pores), the correlation between source and reservoir is relatively high, which are the most favorable lithofacies assemblages for the enrichment of continental shale oil and gas.

Key words: continental shale gas; organic matter pore; source–reservoir coupling; Ziliujing Formation; Sichuan Basin

LIU Zhongbao, First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in unconventional oil and gas geology. Add: Sinopec Science and Technology Research Center, Olympic building, No. 197, Baisha Rd., Changping District, Beijing 102206, China