

四川盆地湖相页岩气源-储配置类型及评价

朱彤^{1,2}, 胡宗全^{1,2}, 刘忠宝^{1,2}, 冯动军^{1,2}

(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)

摘要:四川盆地湖相页岩气勘探已在建南、涪陵和元坝地区中-下侏罗统获得良好的页岩气显示和工业气流, 展示了良好的勘探前景。与海相富有机质页岩相比, 湖相泥页岩具有沉积相变快、岩相类型多样(互层、夹层)、有机质丰度较低、储集非均质性强和源-储配置复杂的特点。依据不同的岩相类型, 将湖相泥页岩划分为源夹储、源储互层2大类4亚类源-储配置类型。采用有机地化、微观储渗实验及纳米CT等方法技术, 在对每一种源-储配置类型进行生烃、储集和可压性特征研究的基础上, 将不同的源-储类型作为独立的“源储体”单元, 创建了与湖相多类型源-储配置特征相适应的源储体系数进行评价。评价结果表明, 碳酸盐湖泊沉积的页岩与介屑灰岩互层型具有良好页岩气生烃、储集、渗透和可压裂配置条件, 有利于页岩气的形成和改造, 是湖相最有利的源-储配置类型; 页岩夹介壳灰岩源-储配置型具有良好页岩气生烃和储集条件, 但渗透性和可压性较差, 为较有利源-储配置类型, 上述两种类型可作为湖相页岩气开发的优选层段。

关键词:湖相; 岩相; 源-储配置类型; 源储体系数; 页岩气; 四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Types and evaluation of the source-reservoir configuration of lacustrine shale gas in the Sichuan Basin

Zhu Tong^{1,2}, Hu Zongquan^{1,2}, Liu Zhongbao^{1,2}, Feng Dongjun^{1,2}

(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)

Abstract: Exploration of the lacustrine shale gas in Sichuan Basin has discovered strong gas shows and/or commercial gas flow in the Middle and Lower Jurassic of Jiannan, Fuling, and Yuanba areas, east of Sichuan, which are prospective areas for petroleum exploration. Compared with organic-rich marine shale, the lacustrine shale is characterized by fast change of sedimentary facies, diversity of lithofacies (interbed and alternating beds), low abundance of organic matters, strong reservoir heterogeneity and complex source-reservoir configuration. According to the types of lithofacies, the lacustrine shale can be divided into two types of source-reservoir configuration, namely the type of “reservoir interbedded within source rocks” configuration and the type of “source-reservoir alternating” configuration, which can be further subdivided into four subtypes. Through such methods as organic geochemistry, microscopic storage and permeability experiments and nano CT, we studied the characteristics of hydrocarbon generation, storage capacity and fracturability for each type of source-reservoir configurations, and established the evaluation model for source-reservoir coefficients conformable to the characteristics of the lacustrine source-reservoir configurations of various types, with each type as an independent “source-reservoir” unit. The evaluation results show that the source-reservoir configuration of the alternating shale and shell limestone deposited in a carbonate lake has favorable conditions for hydrocarbon generation, shale gas storage, permeability and fracturability, beneficial to the formation and stimulation of shale gas reservoirs, thus functions as the most favorable type of source-reservoir configuration of the lacustrine facies. In comparison, the source-reservoir configuration with shell limestone interbedded within shale has favorable hydrocarbon generation and reservoir conditions, but poor permeability and fracturability, thus is fair in quality. The above two types can be taken as the preferred layer for the development of lacustrine shale gas.

收稿日期: 2018-01-12; 修订日期: 2018-07-15。

第一作者简介: 朱彤(1968—), 女, 高级工程师, 非常规油气勘探开发规划和页岩气。E-mail: zhutong_syky@sinopec.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05036-004-001); 页岩油气国家重点实验室基金项目(G5800-17-ZS-ZZGY002)。

Key words: lacustrine facies, lithofacies, source-reservoir configuration type, source-reservoir coefficient, shale gas, Sichuan Basin

在多旋回构造演化过程中,四川盆地发育了海相、陆相和海陆过渡相多套富有机质泥页岩^[1-2]。目前除了在川东南涪陵焦石坝、川南威远、长宁五峰组-龙马溪组实现商业开发外,在元坝、涪陵北和建南等地区中-下侏罗统湖相泥页岩层系也获得工业气流和稳定产量。其中川东北元坝地区大安寨段5口直井试获 $(14 \sim 50) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流,鄂西渝东建南地区东岳庙段垂深600~620 m泥页岩段水平井压裂最高日产气 $1.23 \times 10^4 \text{ m}^3$,稳定日产气2 000~3 000 m^3 ,展示了四川盆地湖相页岩气良好的勘探前景^[3-5]。

与四川盆地海相五峰组-龙马溪组发育稳定的深水陆棚沉积,富有机质页岩单层厚度较大,横向分布稳定^[6],具有典型的源储一体、源储共生^[7]的页岩气形成特征相比,陆相湖盆分布范围较海相规模小,受周缘构造活动影响大,导致湖相泥页岩沉积相变快,岩性变化频繁,单层厚度薄,岩相类型多样(互层、夹层),有机质丰度较低,储集非均质性强^[8],源-储配置复杂。

四川盆地中-下侏罗统自下而上分为珍珠冲段、东岳庙段、马鞍山段和大安寨段,暗色泥页岩主要分布在大安寨和东岳庙两个湖泛期,为一套泥页岩与介壳灰岩、粉砂岩的不等厚互层沉积;中侏罗统千佛崖组(凉高山组)继承了下侏罗统的沉积格局,自下而上分为千一段(凉一段)、千二段(凉二段)和千三段(凉三段),暗色泥页岩主要分布在千二段(凉二段)湖泛期,主要为一套泥页岩与粉砂岩的不等厚互层沉积。本文在对东岳庙段、大安寨段和千二段(凉二段)3个湖泛期暗色泥页岩层系不同岩相划分的基础上,探讨不同岩相的源-储配置特征,对有利的源-储配置类型进行评价。

1 沉积及岩相特征

1.1 沉积模式及沉积相

四川盆地中-下侏罗统不同时期由于构造活动的差异,受周缘山系物源影响,湖侵范围的不同,导致不同时期的湖相沉积模式和沉积相存在着较大的差异。主要体现在浅湖-半深湖亚相的划分上。浅湖亚相位于枯水期水面至浪基面之间的浅水地带,沉积物受波浪和湖流作用的影响明显。通过对不同层段泥页岩层系中灰岩和砂岩夹层的厚度和占比统计,按照沉积物的不同,将中-下侏罗统划分为最大湖进期碳酸盐湖

泊和局限湖进期陆源碎屑湖泊两种沉积模式^[9]。

碳酸盐湖泊主要发育于四川盆地周缘构造相对稳定的最大湖进期,以大安寨段为代表。沉积受陆源碎屑物源的影响较小,湖盆范围最大,水体清澈,浮游生物丰富,沉积亚相以滨湖-碳酸盐岩浅湖-湖坡-半深湖沉积为特征,湖盆分布于川中-川东北地区(图1)。沉积微相主要包括砂坝、介屑滩、滩间泥、风暴滩、湖坡泥和半深湖泥等(图2),其中湖坡风暴滩微相为浅湖介屑滩受风暴流的作用,打碎后间歇进入湖盆中,就近堆积在湖盆斜坡位置,呈现为风暴滩与湖坡泥交替沉积^[10-11],岩性以黑色、灰黑色页岩与薄层介屑灰岩不等厚互层,水平层理发育,与半深湖泥微相一样富含黄铁矿、菱铁矿等还原性自生矿物沉淀的较深水环境,有利有机质保存。

陆源碎屑湖泊主要发育于四川盆地周缘构造相对活跃的局限湖进期,以元坝千二段和东岳庙段为代表。沉积受四川盆地西南陆源碎屑物源的影响较大,以扇三角洲-滨湖-碎屑岩浅湖-半深湖沉积为特征,湖盆分布范围局限于川东地区。沉积微相主要包括扇三角洲前缘砂体、砂质滩、砂泥坪和半深湖泥等,岩性为深灰、灰色细砂岩-粉砂岩、灰黑色的块状泥岩、泥岩夹薄层粉砂岩等。泥页岩理不发育,粉砂岩条带和薄夹层具波状层理及沙纹层理,显示浅湖泥虽主要形成于浪基面之下的低能带,但持续受底流和湖浪改造作用,由河流间歇注入浅湖的漫流席状砂沉积较发育。因入湖河水带入的物源碎屑多,水体浑浊,生物不发育,不利于有机质保存。

1.2 岩相类型划分

按照湖相泥页岩层系岩性及组合特征,对涪陵、元坝和建南地区XL101等4口井东岳庙段、大安寨段和千二段的岩相进行划分,总体可归为6大类,每一类所对应了不同湖泊沉积的沉积微相类型(表1)。最大湖进期碳酸盐岩湖泊的岩相类型主要包括半深湖泥沉积的页岩夹薄层介壳灰岩相、湖坡风暴滩沉积的页岩与介屑灰岩互层相以及碳酸盐浅湖介屑滩沉积的介屑灰岩夹页岩相3类;局限湖进期陆源碎屑湖泊的岩相类型主要包括半深湖沉积的厚层泥页岩夹薄层粉砂岩相,滨、浅湖砂泥坪沉积的纹层状泥页岩与粉砂岩不等厚互层相以及滨湖砂坝沉积的粉砂岩夹泥页岩相3类。

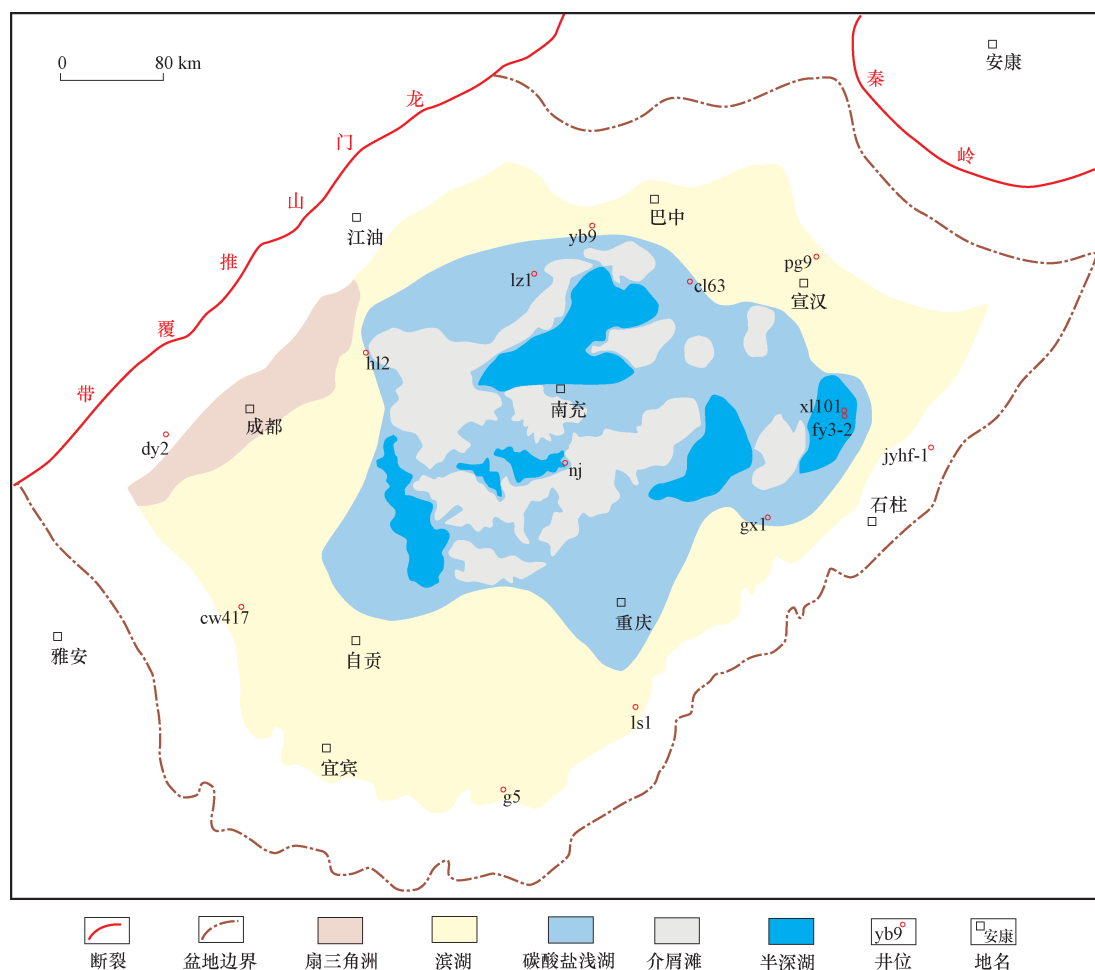


图1 四川盆地下侏罗统大安寨段沉积相

Fig. 1 Sedimentary facies of the Lower Jurassic Da'anhai Formation, Sichuan Basin

2 湖相页岩气源-储配置类型及特征

在湖相泥页岩岩相类型划分的基础上,选取泥地比大于50%的岩相,依据泥页岩与灰岩、砂岩纵向上组合方式,将四川盆地东岳庙段、大安寨段和千二段(凉二段)划分为源夹储型、源储互层型2大类4亚类源-储配置类型。采用有机地化、微观储渗实验及纳米CT等方法技术,对每一种源-储配置类型的生烃、储集和可压性特征进行研究。

2.1 源夹储型

主要包括页岩夹介壳灰岩型和泥页岩夹粉砂岩型,泥地比在70%~90%。

2.1.1 页岩夹介壳灰岩型

该类型为碳酸盐湖泊的半深湖泥微相沉积,岩性主要为含介壳页岩,岩相为厚层页岩夹薄层介壳灰岩,具有有机质和孔隙度较高,孔隙连通体积、渗透率和脆性

指数较低的特点。有机碳含量平均为1.02%,粘土矿物含量较高,平均为51.18%,孔隙类型以粘土矿物晶间孔为主(图3a),与海相有机质孔广泛发育不同^[12-14],湖相页岩演化程度较低, R_o 多在1.1%~1.8%,有机质孔随演化程度增加而逐渐发育(图3b,c)。孔隙度较高,平均为3.23%;有机碳与粘土、孔隙度具有一定的正相关关系。纳米CT微观结构中见粘土质矿物定向分布(图3d),测定的局部有机质含量可高达4.2%,但孔隙度仅为2.27%,孔喉以中-大孔为主,主要分布在30~90 nm范围内,以40 nm为峰值。孔隙连通性较差,孔隙连通体积仅为 $3.84 \times 10^{11} \text{ nm}^3$ 。渗透率中等,平均为 $6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,微裂缝仅在夹层处可见。脆性矿物中硅质含量平均为34.79%,钙质含量较低,平均为14.03%,脆性指数(硅质+钙质)为0.52,可压性较差。

2.1.2 泥页岩夹粉砂岩型

该类型为陆源碎屑湖泊的滨、浅湖泥坪微相沉积,岩性主要为含粉砂质泥岩,岩性组合为厚层泥岩夹薄

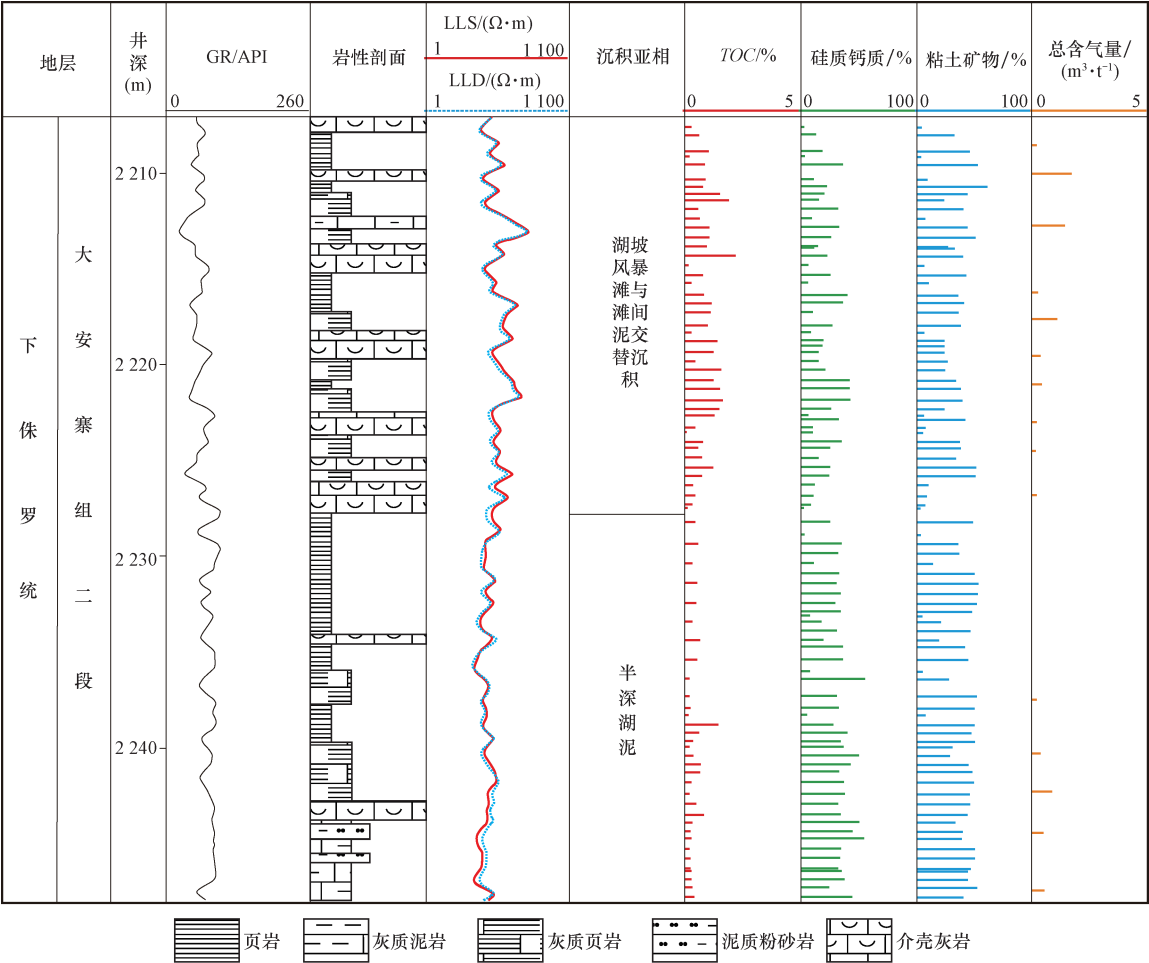


图 2 四川盆地 FY3 井大安寨二段页岩气形成条件综合柱状图

Fig. 2 Composite column of shale gas forming conditions in the 2nd member of Da'an寨 Formation in Well FY3, Sichuan Basin

表 1 四川盆地中 – 下侏罗统泥页岩层系岩相类型

Table 1 Types of shale lithofacies in the Middle and Lower Jurassic, Sichuan Basin

岩相类型	厚层页岩夹薄层介壳灰岩相	页岩与介屑灰岩不等厚互层相	厚层介屑灰岩夹薄层泥页岩相	厚层泥页岩夹薄层粉砂岩相	纹层状泥页岩与粉砂岩不等厚互层相	厚层粉砂岩夹薄层泥岩相
典型岩心剖面						
泥地比/%	70 ~ 90	50 ~ 70	小于 50	70 ~ 90	50 ~ 70	小于 50
微相类型	半深湖泥	湖坡风暴滩	介屑滩	半深湖泥	浅湖砂泥坪	滨湖滩坝
沉积模式	最大湖进期碳酸盐湖泊	最大湖进期碳酸盐湖泊	最大湖进期碳酸盐湖泊	局限湖进期陆源碎屑湖泊	局限湖进期陆源碎屑湖泊	局限湖进期陆源碎屑湖泊
分布层段	涪陵、元坝大安寨二段	涪陵、元坝大安寨二段	涪陵大安寨一段	元坝东岳庙段、千二段	元坝东岳庙段、千二段	元坝东岳庙段、千二段

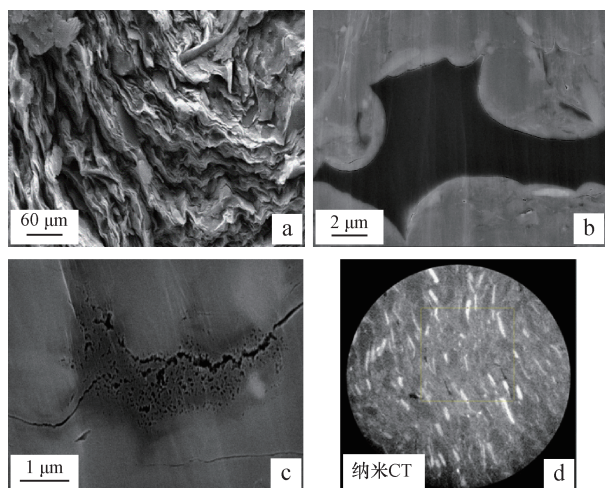


图3 四川盆地页岩夹介壳灰岩型孔隙特征

Fig. 3 Pore characteristics for source-reservoir configuration type of shell limestone interbedded within shale, Sichuan Basin
a. 粘土矿物晶层间孔隙发育, XL101 井, 大安寨段, 埋深 2 146.57 m; b. 有机质孔隙不发育, FY1 井, 大安寨段, 埋深 2 605.9 m, $R_o = 1.1\%$; c. 有机质孔隙沿微缝发育, FY1 井, 东岳庙段, 埋深 2 735.6 m, $R_o = 1.43\%$; d. 粘土质矿物定向分布, FY1 井, 东岳庙段, 埋深 2 735.5 m

层粉砂岩, 具有有机质、孔隙度、渗透率和脆性指数均较低的特点。有机碳含量较低, 平均为 0.8%。孔隙类型以粘土矿物孔为主, 有机质孔不发育, 孔隙度平均为 2.56%。渗透率较低, 平均为 $0.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。页理不发育, 粘土矿物含量较高, 平均为 54.4%; 碎屑硅质含量平均为 40.56%; 钙质少量平均为 5.04%, 脆性指数(硅质 + 钙质)仅为 0.46, 可压性差。

2.2 源储互层型

主要包括页岩与灰岩互层型和页岩与粉砂岩互层型, 泥地比在 50% ~ 70%。

2.2.1 页岩与介壳灰岩互层型

该类型为碳酸盐湖泊湖坡风暴滩微相沉积, 岩性主要为介壳灰质页岩, 岩性组合为页岩与介壳灰岩薄互层, 具有有机质、孔隙度、孔隙连通体积、渗透率和脆性指数均较高的特点。有机碳含量最高可达 3.7%, 平均为 1.42%。孔隙类型以顺层微裂缝和有机质边缘缝为主(图 4a), 有机质孔不发育。孔隙度在 1.25% ~ 6.2%, 平均为 3.34%。纳米 CT 微观结构中可见粘土矿物定向排列中夹有自生菱形方解石、白云石和具有一定磨圆程度的碎屑石英颗粒(图 4b), 测定局部有机质含量可高达 4.1%, 孔隙度为 1.99%, 孔喉以中 - 大孔为主, 主要分布在 30 ~ 110 nm, 以 40 nm 和 80 nm

为峰值。由于岩性组合为页岩与介壳灰岩互层, 页理、水平裂缝和高角度裂缝均发育, 孔隙连通性和渗透率为 4 种源 - 储类型中最好, 孔隙连通体积为 $6.65 \times 10^{11} \text{ nm}^3$, 是页岩夹介壳灰岩型的近 2 倍。渗透率较高, 平均为 $9.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。粘土矿物含量较低, 平均为 38.94%, 硅质含量平均为 25.54%, 钙质含量较高, 平均为 35.52%, 脆性指数(硅质 + 钙质)可达 0.61, 可压性好。

2.2.2 页岩与粉砂岩互层型

该类型为陆源碎屑湖泊的滨、浅湖砂泥坪微相沉积, 岩性主要为粉砂质泥岩, 岩性组合为纹层状砂泥不等厚互层相, 具粘土矿物含量高、有机质较低, 孔隙度、渗透率和脆性指数中等的特点。有机碳含量在 0.5% ~ 1.94%, 平均为 0.9%; 孔隙类型以颗粒边缘残余原生微孔(图 5a)、顺层微裂缝为主, 有机质孔不发育。孔隙度在 1.8% ~ 3.5%, 平均为 2.56%。纳米 CT 微观结构中粘土矿物定向较差(图 5b), 可见具有

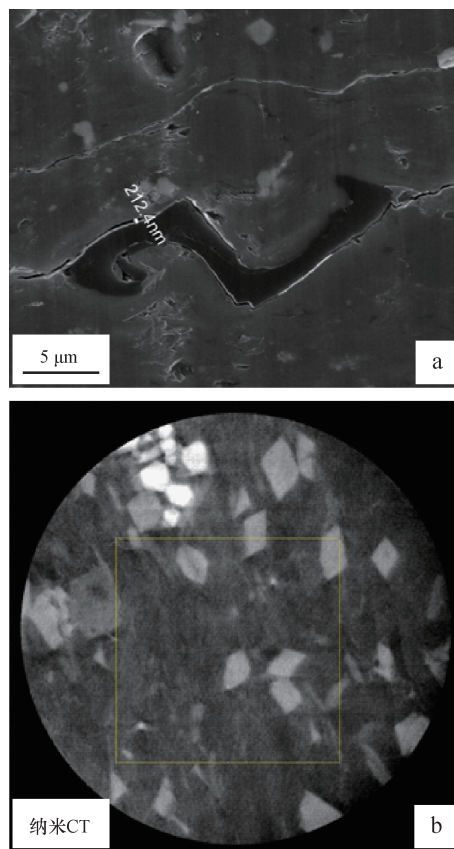


图4 四川盆地页岩与介壳灰岩互层型孔隙特征

Fig. 4 Pore characteristics for source-reservoir configuration type of alternating shales and shell limestones
a. 顺层微裂缝、有机质边缘缝发育, FY3HF-2 井, 大安寨段, 埋深 2 207.2 m; b. 粘土矿物夹有自生菱形方解石、白云石和碎屑石英颗粒, FY5 井, 东岳庙段, 埋深 2 798.31 m

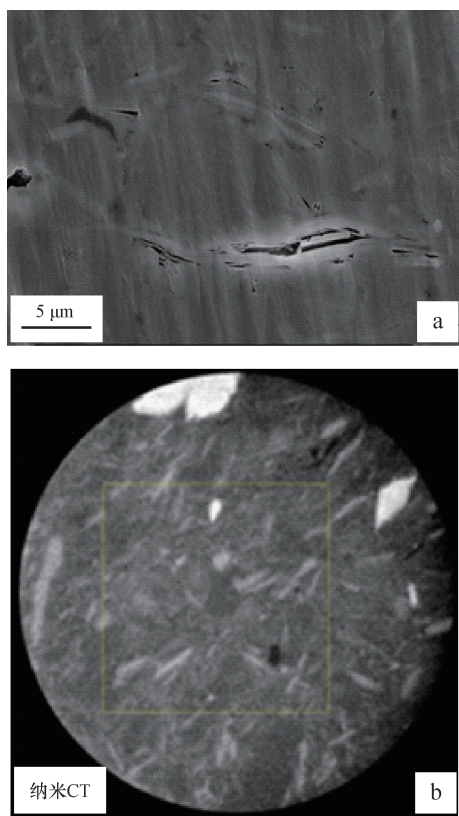


图5 四川盆地页岩与粉砂岩互层型孔隙特征

Fig. 5 Pore characteristics for source-reservoir configuration type

of alternating shales and siltstones, Sichuan Basin

a. 颗粒边缘微缝隙, FY4 井, 大安寨段, 埋深 2 541.9 m;

b. 粘土矿物定向较差, 可见碎屑石英颗粒, JYHF-1 井,

东岳庙段, 埋深 620.53 m

一定磨圆程度的碎屑石英颗粒, 测定局部有机质含量仅 1.19%, 孔隙度为 1.28%, 孔喉以中-大孔为主, 主要分布在 40~300 nm, 以 40~100 nm 为主; 沉积纹层和高角度缝发育, 孔隙连通性较好, 孔隙连通体积为 $5.28 \times 10^{11} \text{ nm}^3$, 仅次于页岩与介屑灰岩互层型。渗透率中等, 平均为 $5.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。粘土矿物含量较高, 平均为 56.45%, 碎屑硅质在 17.3%~59.6%, 平均为 35.68%; 钙质少量, 平均为 7.87%, 脆性指数(硅质+钙质)为 0.44, 可压性差。

3 基于源储体系数的源-储配置类型评价

3.1 源储体系数构建

页岩气具有生烃、储集和后期改造兼备的“地质”和“工程”双甜点叠置的特点^[15]。页岩作为烃源层, 有机碳含量(TOC)高低决定于生气潜力的优劣, 也决定着生气量多少。页岩有机碳含量越高, 越有利于页岩

气聚集, 同时页岩作为储层, 其储集性能的好坏对页岩气的富集至关重要^[16-17]。湖相泥页岩沉积相变快, 单层厚度薄, 岩相类型复杂, 多以泥页岩与灰岩、粉砂岩互层、夹层组合方式呈现。生烃主要以泥页岩为主, 储集性除了泥页岩自身影响外, 与泥页岩中的灰岩、粉砂岩夹层及其之间的组合方式(互层和夹层)也密切相关, 因此湖相泥页岩层系具有多类型复杂的源-储配置的特点。不同源-储配置类型中泥页岩的生烃能力与灰岩、砂岩夹层的储集性能之间的协同关系, 以及页岩气水平井开发中的可压裂性, 共同决定了湖相页岩气的富集的物质基础。

目前, 四川盆地侏罗统已在元坝、涪陵和建南直井勘探中获得了高产工业气流, 但至今未实现经济有效开发的关键之一是复杂岩性(泥页岩与灰岩、粉砂岩互层、夹层)页岩气水平井及适应性压裂工程技术关键技术还未形成, 难以实现经济有效开发。因此, 针对陆相多类型源-储配置的特点, 不仅要考虑有机质丰度和孔隙类型、孔隙度大小等“地质”甜点对页岩气富集的影响, 更要重视不同源-储配置类型对可压裂性的影响。

前人依据五峰组-龙马溪组海相页岩气源储一体、源储共生的特点, 建立的页岩气藏的源-储一体的评价思路及源-储耦合系数($10\,000\ TOC\Phi$, 其中, TOC 为有机质含量, Φ 为孔隙度)进行评价^[18](胡宗全, 2016), 对于陆相有机质丰度较低(TOC 多小于 2%), 孔隙度差异小(多分布于 2%~4%), 源-储配置类型多样(页岩夹介壳灰岩型、泥页岩夹粉砂岩型和页岩与灰岩互层型、页岩与粉砂岩互层型), 且不同源-储配置类型对后期改造影响较大的特点, 仅通过源-储耦合系数评价, 不能有效地反映湖相不同岩性组合方式的差异对可压裂性的影响, 需要增加可压裂性评价参数。硅质和钙质总和作为泥页岩矿物组成中脆性矿物的主体^[19], 其含量多少与压裂工程密切相关, 为开发水平井的压裂提供依据。

按照地质、开发和工程三者一体化的思路, 将不同的源-储类型作为一个独立的“源储体”单元(类似于致密砂岩储层“储渗体”^[20-21]的概念)进行源-储-可压裂性综合评价。在前人源-储耦合系数的基础上, 增加反映不同源-储类型可压裂性的脆性指数表征参数, 创建了与陆相多类型源-储配置相适应的源储体系数进行评价, 即源储体系数 = $10\,000\ TOC\Phi B_i$, (B_i 为脆性指数, 小数), 并据此对 4 口井东岳庙段、大安寨段和千二段 3 个泥页岩层段不同的源-储配置类型进行了源储体系数的计算。

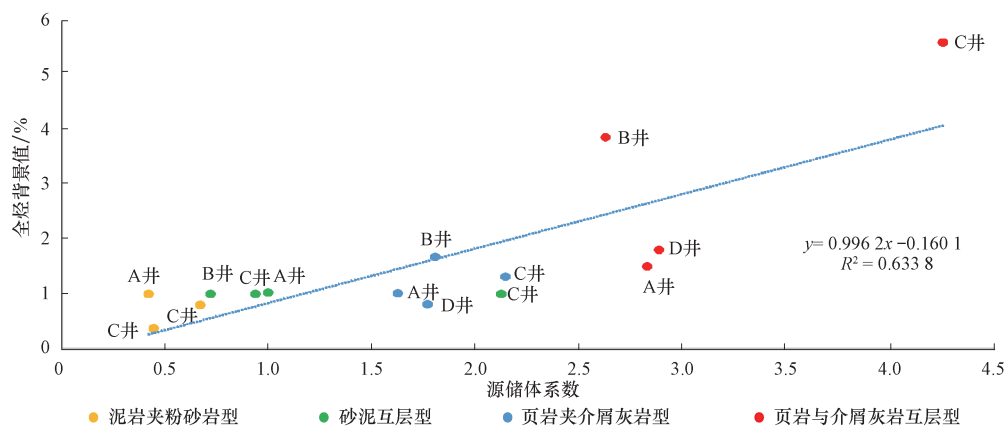


图6 四川盆地不同源-储配置类型源储体系数与全烃背景值关系

Fig. 6 Correlation between source-reservoir coefficient and total hydrocarbon background value for different source-reservoir configuration types, Sichuan Basin

3.2 源-储配置类型评价

通过上述源-储配置类型的生烃、储集和可压裂性特征参数的源储体系数与含气性相关性分析表明,源储体系数与全烃背景值(去掉因裂缝发育导致的气测峰值)具有良好的正相关关系(图6)。

以碳酸盐湖泊沉积占主导的页岩夹介壳灰岩型和页岩与介屑灰岩互层型,有利有机质保存,有机质含量较高,有机孔相对发育,生烃和储集性较好。但因这两种类型源-储配置的方式不同(前者为夹层,后者为互层),其孔隙连通性和渗透性却存在较大的差异。页岩与介屑灰岩互层型更有利于水平裂缝的发育,连通性更好,而且脆性矿物除含硅质外,钙质含量较高,可压裂性最好,源储体系数大于2.5,全烃背景值在同一井中最高,为好的源-储配置类型;页岩夹介壳灰岩型虽然有机质含量和孔隙度较高,但孔隙连通性较差,加之粘土矿物含量高,钙质含量较低,可压裂性较差,源储体系数在1.5~2.5,同一井中全烃背景值较页岩与介屑灰岩互层型低,为较好的源-储配置类型。

以陆源碎屑湖泊沉积占主导泥页岩夹粉砂岩型和页岩与页岩与粉砂岩互层型,受陆源碎屑物源的影响,有机质含量低,有机孔不发育,基质储渗性较差。其中泥页岩夹粉砂岩型的最差,脆性矿物以碎屑硅为主,钙质含量低,粘土矿物含量较高,可压裂性差,源储体系数多小于1.5,全烃背景值在同一井中最低,不利于页岩气的形成和改造,为较差的源-储配置类型。

4 结论

以湖相不同岩相为基础的源-储配置类型研究和

评价表明,碳酸盐湖泊沉积页岩与介屑灰岩互层相具有良好页岩气生烃、储集、渗透和可压裂性形成条件,有利于页岩气的形成和改造,是湖相最有利的源-储配置类型;偏泥质相的页岩夹介壳灰岩相具有良好页岩气生烃和储集条件,但孔隙连通性、渗透性和可压性较差,为较有利源-储配置类型;陆源碎屑湖泊沉积的泥页岩夹粉砂岩相和页岩与页岩与粉砂岩互层型相,有机质含量较低,储渗性和可压性较差,不利于页岩气的形成和改造,为不利的源-储配置类型。因此以碳酸盐湖泊沉积的页岩与介屑灰岩互层和夹层相为主的页岩区和层段可作为湖相页岩气勘探的有利目标区和开发的优选层段。

参 考 文 献

- [1] 张金川,姜生玲,唐玄,等.我国页岩气富集类型及资源特点[J].天然气工业,2009,29(12):109-114.
Zhang Jinchuan, Jiang Shengling, Tang Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 109-114.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 郑和荣, 高波, 彭勇民, 等. 中上扬子地区下志留统沉积演化与页岩气勘探方向[J]. *古地学报*, 2013, 5(5): 646-656.
- Zheng Herong, Gao Bo, Peng Yongmin, et al. Sedimentary evolution and shale gas exploration direction of the Lower Silurian in Middle-Upper Yangtze area [J], 2013, 15(5): 646-656.
- [7] 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 Formation in the Sichuan Basin and its adjacent areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 8-17.
- [8] 朱彤, 包书景, 王烽. 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*, 2012, 32(9): 1-6.
- Zhu Tong, Bao Shujing, Wang Feng. The prospect of exploration and production and forming condition of shale gas inland facies, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(9): 1-6.
- [9] 朱彤, 龙胜祥, 王烽, 等. 四川盆地湖相泥页岩沉积模式及岩石相类型[J]. *天然气工业*, 2016, 6(8): 22-28.
- Zhu Tong, Long Shengxiang, Wang Feng, et al. Sedimentary models and lithofacies types of lacustrine mud shale in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 6(8): 22-28.
- [10] 郑荣才. 四川盆地地下侏罗统大安寨段高分辨率层序地层学[J], *沉积学报*, 1998, 16(2): 42-49.
- Zheng Rongcai. High-resolution sequence stratigraphy of Daanzhai Formation, Lower Jurassic in Sichuan Basin [J], *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(2): 42-49.
- [11] 郑荣才, 何龙, 梁西文, 等. 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*, 2013, 33(12): 30-40.
- Zheng Rongcai, He Long, Liang Wenxi, et al. Forming conditions of shale gas (oil) plays in the Lower Jurassic Daanzhai member in the eastern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(12): 30-40.
- [12] 姜振学, 唐相路, 李卓, 等. 川东南地区龙马溪组页岩孔隙结构全孔径表征及其对含气性的控制[J]. *地学前缘*, 2016, 23(2): 126-134.
- Jiang Zhenxue, Tang Xianglu, Li Zhuo, et al. The whole aperture pore structure characteristics and its effect on gas content of the Longmaxi Formation shale in the southeastern Sichuan basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(2): 126-134.
- [13] 杨超, 张金川, 唐玄. 鄂尔多斯盆地陆相页岩微观孔隙类型及对页岩气储渗的影响[J]. *地学前缘*, 2013, 20(4): 299-304.
- Yang Chao, Zhang Jinchuan, Tang Xuan. microscopic pore types and its impact on the storage and permeability of continental shale gas, Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 299-304.
- [14] 朱彤, 王烽, 俞凌杰, 等. 四川盆地页岩气富集控制因素及类型[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(3): 399-407.
- Zhu Tong, Wang Feng, Yu Lingjie, et al. Controlling factors and types of shale gas enrichment in the Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(3): 399-407.
- [15] 李新景, 胡素云, 程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. *石油勘探与开发*, 2007, 34(4): 392-400.
- Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2007, 34(4): 392-400.
- [16] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(4): 523-533.
- [17] Hentz T F, Ruppel S C. Regional stratigraphic and rock characteristics of Eagle Ford Shale in its play area: Maverick Basin to east Texas Basin [R]. AAPG Annual Convention and Exhibition, Houston, Texas, USA, 2011, April 10-13.
- [18] 胡宗全, 杜伟, 彭勇民, 等. 页岩微观孔隙特征及源-储关系[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.
- [19] Stephen E. Laubach, Jon E. Olson, Michael R. Gro. Mechanical and fracture stratigraphy [J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(11): 1413-1426.
- [20] 黎从军. 川北柏垭地区大安寨一亚段储渗体特征及油气分布[J]. *石油与天然气地质*, 2002, 23(1): 81-83.
- Li Congjun. oil gas prediction and characteristics of reservoir bodies for Daanzhai-1 Submember in Baiya of North Sichuan [J]. *Oil & Gas Geology*, 2002, 23(1): 81-83.
- [21] 朱彤, 叶军. 川西坳陷致密碎屑岩气藏类型划分及特征[J]. *石油实验地质*, 2004, 26(6): 537-546.
- Zhu Tong, Ye Jun. Types and characteristics of tight clastic rock gas pools in the west Sichuan Depression [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2004, 26(6): 537-546.

(编辑 张玉银)