

文章编号:1000-0550(2015)06-1224-11

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2015.06.015

致密气源层内沉积特征及与致密砂岩气藏关系^① ——以川东北元坝地区须三段为例

汤建荣^{1,2} 王金友³ 章诚诚^{1,2} 宋广增^{1,2} 石英涛^{1,2} 张雷⁴

(1.中国地质大学(武汉)资源学院 武汉 430074;2.中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室 武汉 430074;
3.中国石油大学(华东)地球科学与技术学院 山东青岛 266580;4.中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249)

摘要 川东北元坝地区须三段长期被认为是烃源岩层,在该层试气中获得 $120.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流井,表明以须三段为代表的致密气源层内勘探前景广阔。本文依据钻井取芯、测井、录井等资料,运用多信息综合研究方法,详细研究了川东北元坝地区须三段沉积特征、沉积演化及源储配置特征,进而探讨致密气源层内致密砂岩气藏的展布特征。研究表明研究区西区发育辫状河三角洲,东区发育曲流河三角洲;通过分析十多种沉积微相类型,结果表明辫状河道、水下辫状主河道及水下分流河道储集砂体为元坝地区须三段最有利的储集相带。同时,东、西区源储配置差异明显;东区底部为厚套的水下分流河道砂体,顶部为薄层的砂体与煤及炭质泥岩互层;西区水下辫状河道及辫状河道砂体分布范围广,多层砂体叠置连片,砂体与煤系烃源岩构成互层,似“千层饼”状特征。相对于东区,西区源储配置特征对于致密气成藏更为有利,因此建议将以后的勘探重点放在西部的致密砂岩勘探区域。

关键词 元坝地区 致密砂岩气 沉积相 沉积演化 源储配置

第一作者简介 汤建荣 男 1989年出生 硕士研究生 沉积学与油气地质学 E-mail: tangjianrong27@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

致密砂岩气(致密气)已成为全球非常规天然气勘探开发的重要领域之一。按照资源三角分布概念^[1],致密气资源量应超过常规天然气资源量,表明全球致密气资源潜力非常巨大,具有广阔的勘探前景。截止2011年年底,我国已累计探明致密气地质储量 $3.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 左右,约占全国天然气总探明储量的39%^[2];2013年致密气产量大致在 $340 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占全国天然气总产量的1/4^[3],是目前最为现实的非常规天然气勘探领域^[4]。国外对于致密砂岩的开发已实现工业化^[5-7],而我国致密气则进入大规模勘探开发与快速发展阶段,已形成鄂尔多斯盆地上古生界与四川盆地上三叠统须家河组2大致密气现实区^[8-9]。

目前四川盆地上三叠统须家河组致密气藏的基本地质特征研究,主要可归纳为以下三点:①须一段、须三段及须五段烃源层具备形成大中型气田的烃源岩条件^[10-12];②须家河组致密气具有源储紧邻,呈“三明治”式生储盖结构^[13-14];③须二段、须四段及须六段为目前主力致密气储层^[13,15-17]。在川东北元坝地区致密气勘探实践中,元陆7井在须三段试气获得 $120.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ 高产工业气流,表明须三段致密气勘

探开发拥有巨大潜力,暗示气源岩层段内的致密气勘探前景广阔。查明气源岩层段内沉积环境与微相分布基础上,开展源内找气会是今后天然气发现和储量增长的重要领域^[14]。然而,前人对须一段、须三段及须五段气源岩层段内沉积微相展布、源储配置特征等方面鲜有研究。本文依据钻井取芯资料,充分应用测井、录井等数据,运用多信息综合研究方法,尝试通过分析元坝地区东、西区须三段沉积微相特征及沉积演化,对比研究区东、西区须三段内部优势储集相带与有利烃源岩配置的差异,进而探讨致密气源层内致密砂岩气藏的展布特征。

1 地质概况

元坝地区位于四川盆地东北部,构造位置上处于米仓山整体向南倾斜的复式单斜构造带、大巴山弧形逆冲推覆带和龙门山冲断带的叠合影响区域(图1A)。晚三叠世开始,川东北地区在龙门山冲断带远程效应和米仓山—大巴山逆冲推覆的影响下产生挠曲沉降形成了类前陆盆地^[18-20]。须三段沉积期米仓山—大巴山构造山系尚处于低幅稳定隆升状态,碎屑物质经长距离搬运在研究区东区沉积曲流河三角洲

①国家自然科学基金(批准号:41273001)资助
收稿日期:2015-01-13;收修改稿日期:2015-03-11

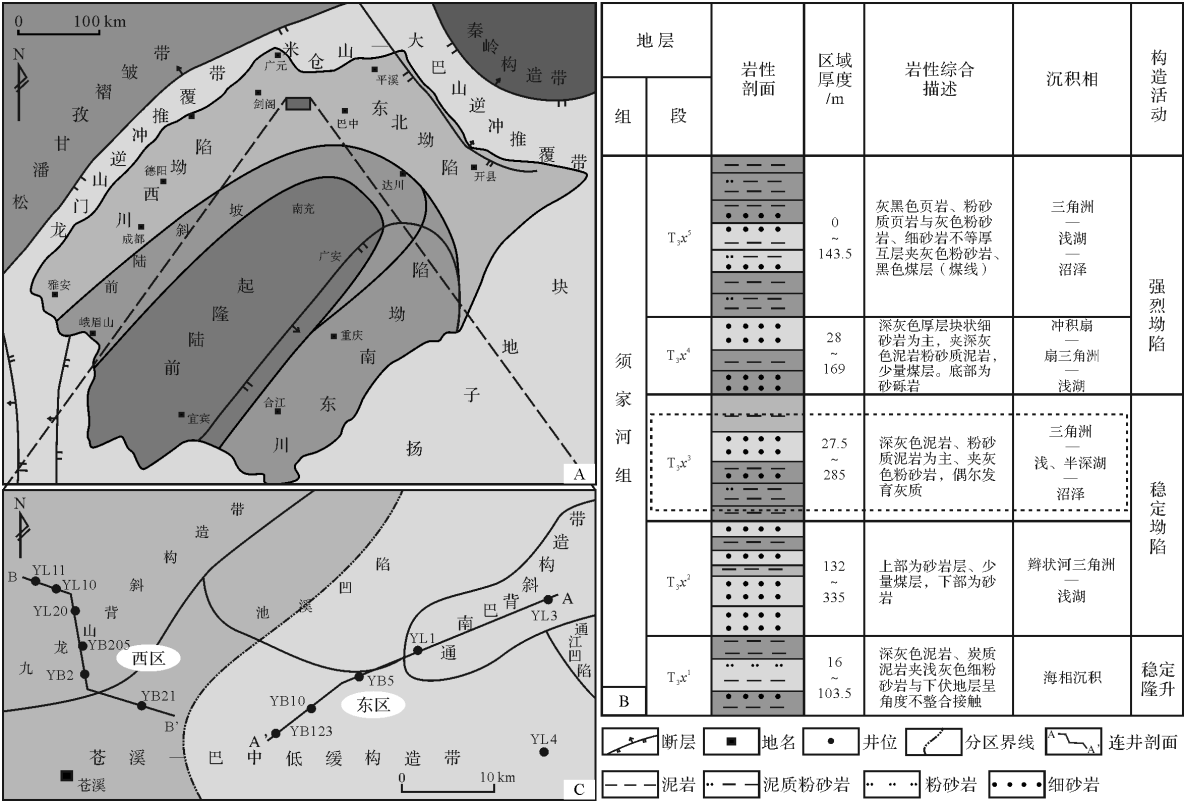


图1 川东北元坝地区构造位置(据郑荣才等修改,2003)、井位(据田成伟等修改,2012)及地层综合柱状图(据印峰等修改,2012)(A.构造位置;B.地层综合柱状图;C.井位图)

Fig.1 Structure location (according to Zheng, 2003), well location (according to Tian, 2012) and generalized column of stratigraphic (according to Yin, 2012) in Yuanba area, NE Sichuan Basin (A. structure location; B. generalized column of stratigraphic; C. well location)

前缘沉积;而龙门山构造山系的逆冲推覆作用较为活跃,川东北前陆盆地主要受龙门山逆冲推覆作用远端效应影响的前陆斜坡带,粗碎屑物质沿前陆斜坡经较短距离搬运,在研究区西区沉积辫状河三角洲沉积,盆地前缘地带向中心地带则主要发育滨浅湖沉积^[18,21-25]。须家河组纵向上划分为须一段—须六段,其中,须一段、须三段、须五段为滨浅湖相粉砂质泥岩沉积;须二段、须四段、须六段为大规模辫状河三角洲沉积,广泛发育厚层砂岩储层(图1B)。研究区须家河组缺失须六段,依据高分辨率层序地层学原理及前人的研究成果,须三段可进一步划分为2个中期、4个短期基准面旋回,每个短期基准面旋回所对应的地层单元为一期砂组,即自下而上划分为I~IV砂组^[26-28]。

2 沉积相特征

本文结合岩芯观察、测井曲线及成分成熟度资料,发现研究区沉积相及碎屑成分存在明显分区特征

(图1C)。与野外剖面岩屑特征统计^[25]和地球物理及地质统计物源方向^[29]一致。

2.1 东区沉积相

研究表明研究区东区仅沉积曲流河三角洲前缘。主要微相类型包括:水下分流河道、支流间湾、河口坝、远砂坝及席状砂沉积(图2)。水下分流河道微相沉积物以细砂岩、粉砂岩为主,发育冲刷—充填构造(图2B)、交错层理及波状层理(图2C)等沉积构造,整体为下粗上细的正韵律,对应的自然伽马曲线为中幅钟形或齿化箱形。支流间湾以黏土沉积为主,含少量粉砂和细砂岩,炭质泥岩中偶夹灰质团块,黄铁矿颗粒不均匀分布于泥岩中,发育水平层理和透镜状层理;其上发育富含有机质的沼泽沉积。河口坝由质纯、分选好、磨圆好的细砂岩和粉砂岩组成,发育槽状交错层理,整体为下细上粗的反韵律,对应自然伽马曲线为中幅的漏斗形。远砂坝及席状砂,沉积物较河口坝细,以粉砂岩为主,整体为下细上粗的反韵律,对应自然伽马曲线为低幅漏斗形或指形。

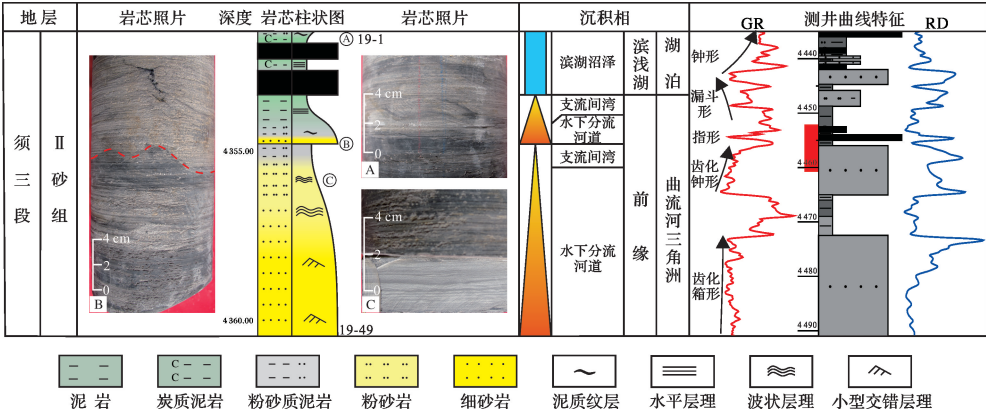


图 2 曲流河三角洲前缘沉积特征

元陆 4 井须三段 2 砂组;井位置见图 1B

Fig.2 Sedimentary features of meandering fluvial delta

Well Yuanlu 4, 2 group of T₃x³; well location is shown in Fig.1B

2.2 西区沉积相

龙门山北段物源区发育以碳酸盐岩为主的沉积岩地层^[22],此物源控制研究区西部地区。根据岩性组合特征、沉积构造和砂体形态等研究,西区发育辫状河三角洲相,并进一步识别出辫状河三角洲平原、辫状河三角洲前缘亚相(图 3)。

2.2.1 辫状河三角洲平原亚相

高度的河道化、持续深切的水流及河口坝较不发育为辫状河三角洲平原亚相的典型特征。在研究区的平原亚相中,识别出了辫状河道、冲积平原等沉积微相。

(1) 辫状河道微相 本区该微相以沉积色杂、粒粗、分选较差、磨圆较好砾岩为主,且砾岩与暗色泥岩突变接触(图 3B)为特征。发育块状层理、平行层理(图 3A,I),整体为下粗上细的正韵律,细粒沉积薄或缺失。对应的自然伽马曲线为微齿化的高幅箱型特征。

(2) 冲积平原微相 该微相由辫状河道的迁移摆动形成,岩性以砂砾质沉积为主,发育块状层理(图 3H)、板状交错层理等,对应的自然伽马曲线为中幅钟形特征。发育河漫沼泽沉积,由炭质泥岩,偶夹炭屑条带及煤层,可见植物化石。

2.2.2 辫状河三角洲前缘亚相

研究区辫状河三角洲前缘主要发育水下辫状河道、水下辫状河道间、河口坝、远砂坝及席状砂沉积。岩性较细,主要由钙屑砂岩、粉砂岩、少量含砾砂岩和煤及泥岩组成旋回层系。由于受分流河道迁移、波浪和岸流作用影响,本区河口坝发育规模较小。远砂坝和席状砂为辫状河三角洲前缘边部的末端沉积,岩性

以粉砂岩为主,横向分布范围广,砂体沉积厚度薄,常发育波状层理,自然伽马曲线表现为中—低幅的指形特征。主要沉积微相类型如下:

(1) 水下辫状河道微相 该微相是平原辫状河道在水下的延伸部分,沉积物粒度较细,以中砂岩、细砂岩为主,整体为向上粒度变细,单砂体厚度减薄,分选中等—好,磨圆较好,呈次棱—次圆状;发育冲刷充填构造(图 3F)、平行层理(图 3C)及波状层理(图 3E);垂向剖面结构常显示下粗上细的正韵律,对应的自然伽马曲线为中幅钟形。

(2) 水下辫状河道间微相 该微相沉积于水动力相对较弱的环境中,沉积物粒度较细,以泥岩与粉砂岩为主,常见水平层理及植物化石(图 3D,G),自然伽马曲线为指形或齿化线形特征。

3 东西区沉积相时空演化配置特征及对比

3.1 东西区沉积相平面配置特征

根据须三段残留地层的分布特征、43 口井录井测井资料、砂岩和砾岩百分含量及砂岩碎屑组分特征(图 4),划分不同砂组的沉积相平面分布图(图 5)。结合不同砂组炭质泥岩及煤层分布,研究东西区沉积相平面配置演化特征。

I 砂组沉积时期,龙门山北段逆冲推覆带低幅隆升^[30],遭受剥蚀,为西区提供粗粒沉积,但由于物源供给速率较小,仅在北西方向发育范围较小的辫状河三角洲平原沉积,同时水下辫状河道延伸距离较短。北东方向为主控物源,水下分流河道较宽、延伸距离远,呈指状由北东方向往西南方向切入,薄层砂体在

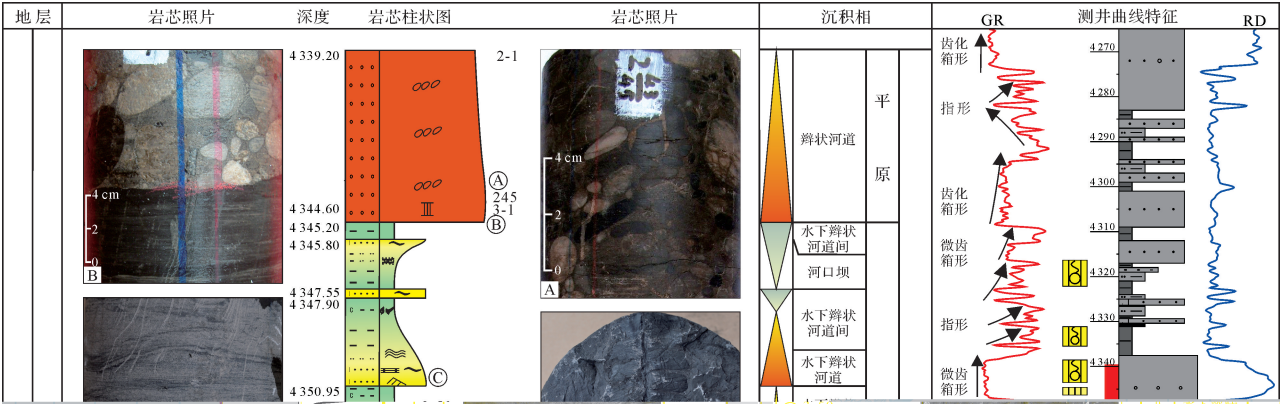


图 3 辫状河三角洲沉积特征(元陆 11 井须三段Ⅲ砂组;井位置见图 1B)

Fig.3 The sedimentary characteristics of braided fluvial delta (Well Yuanlu 11,3 group of T₃x³; well location is shown in Fig.1B)

元坝东部及中部连片分布(图 4-Ⅰ砂组)。稳定的构造背景使得该砂组沉积期炭质泥岩及煤层最为发育,最大厚度可达 13 m;相对于东区,西区炭质泥岩及煤层具有更厚的沉积厚度,和更广的与砂体叠置面积(图 5-Ⅰ砂组)。

Ⅱ砂组沉积时期,龙门山北段逆冲推覆增强^[30],物源供给速率大于可容空间增加速率,导致北西方向辫状河三角洲平原的粗碎屑物质沉积范围更广(图 4-Ⅱ砂组),辫状河三角洲前缘在西区连片分布,水下

辫状河道延伸至中部地区,分流河道间常形成以煤及炭质泥岩为主的间湾沉积。北东方向米仓山—大巴山造山带推覆作用减弱^[24],不再是主控物源,此时水下分流河道延伸距离较短,砂岩展布范围变小;相对Ⅰ砂组,西区煤及炭质泥岩沉积厚度减小、沉积范围缩小,东区煤及炭质泥岩沉积厚度减小、沉积范围向东略微收缩(图 5-Ⅱ砂组)。

Ⅲ砂组沉积时期,龙门山北段物源供给速率低于盆地内可容空间的增加速率,辫状河三角洲平原的粗

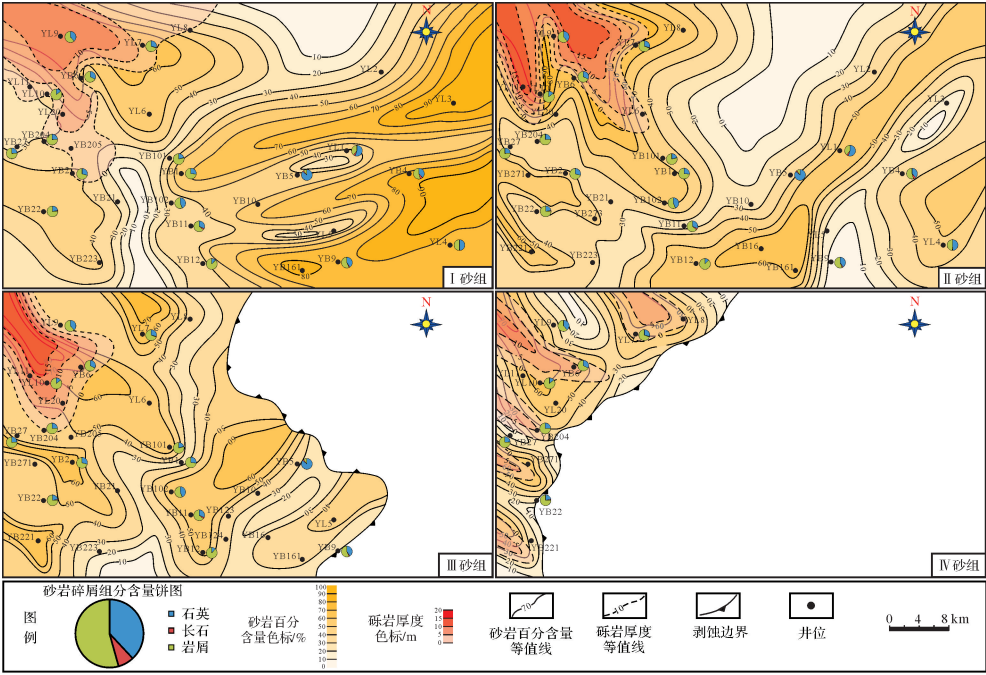


图 4 元坝地区须三段不同砂组砂岩百分含量等值线、砾岩厚度等值线及碎屑组分含量分布图
Fig.4 Contour map of sand content and conglomerate thickness, and the distribution map of the content of clastic components of T_3x^3 in Yuanba area

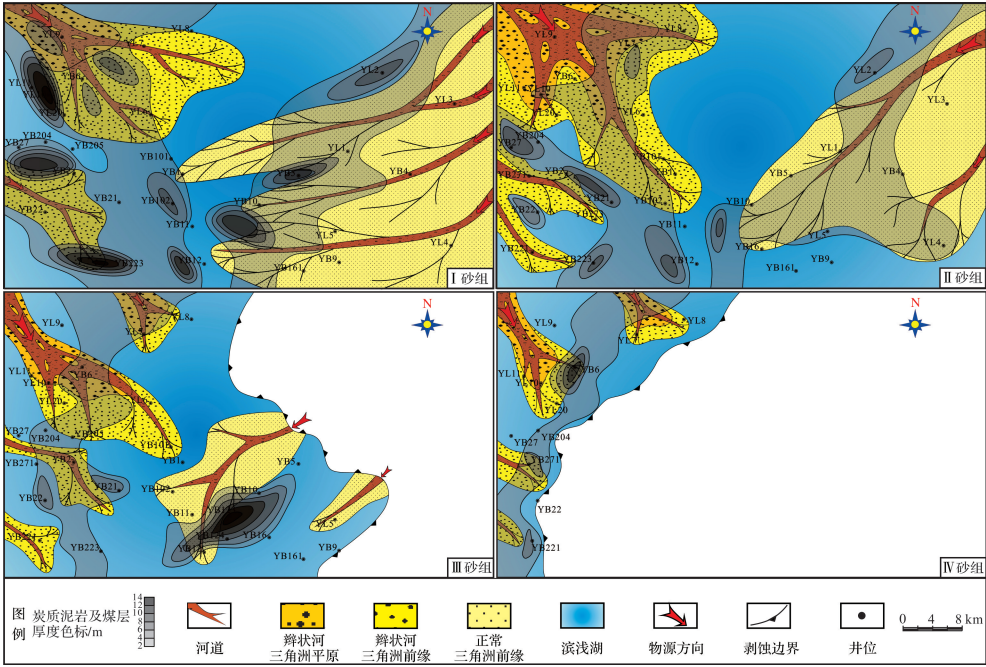


图 5 元坝地区须三段 4 个砂组沉积相与炭质泥岩及煤层平面分布叠合图

Fig.5 The congruency map of sedimentary facies and carbonaceous shale, coal in different group of T_3x^3 in Yuanba area

碎屑物质沉积范围变窄(图 4-Ⅲ砂组),西区多条水下辫状河道由北西方向往南东方向延伸,辫状河三角洲朵体多孤立分布,朵体间常发育滨湖沼泽沉积。受“安县运动”影响^[31-32],须三段Ⅲ砂组东区大部分地

区遭受剥蚀,仅残留两条规模较小的水下分流河道。此沉积期,西区煤及炭质泥岩沉积厚度进一步变薄,沉积范围向西收缩,相对于东区具有更大的与砂体叠置区,而东区煤及炭质泥岩则仅集中于 YB1 井附近

(图 5-Ⅲ砂组)。

Ⅳ砂组沉积时期,受“安县运动”影响,东区及西区大部分地区遭受剥蚀,仅残留西区辫状河三角洲沉积,该沉积期龙门山逆冲推覆减弱,物源供给速率进一步降低,而可容空间进一步增大,导致辫状河三角洲平原进一步往北西方向收缩,水下辫状河道的延伸距离短,辫状河三角洲前缘砂体分布范围缩小。该沉积期,煤及炭质泥岩厚度约为 2~4 m,沉积范围收缩至 YB6—YB271—YB221 井区附近(图 5-Ⅳ砂组)。

3.2 东西区沉积相垂向配置特征

垂向上,东西区沉积相配置差异明显。东区仅沉积Ⅰ至Ⅲ砂组,沉积厚度 27.5~120 m,沿 SW 方向沉积微相展布为水下分流河道—河口坝—远砂坝及席状砂,砂地比逐渐降低,煤层及炭质泥岩厚度逐渐增加。YL3 井Ⅰ砂组沉积厚套水下分流河道砂体,向上沉积物粒度变细,过渡为Ⅱ砂组薄层席状砂与炭质泥岩互层;YL1 和 YB5 井垂向表现为Ⅰ砂组沉积薄层水下分流河道砂体与炭质泥岩互层,向上砂泥比降低,Ⅱ砂组为较厚水下分流河道沉积但与炭质泥岩或煤层并不叠置,Ⅲ砂组零星分布远砂坝及席状砂砂体;YB10 井与 YL3 井相类似Ⅰ砂组沉积厚套水下分流河道砂体,Ⅱ至Ⅲ砂组主要沉积薄层河口坝、远砂坝及席状砂砂体与炭质泥岩互层,零星分布薄层水下分流河道砂体;YB123 井沉积河口坝、远砂坝及席状砂与煤层及炭质泥岩互层。东区垂向上整体表现为水体不断加深,沉积物粒度逐渐变细;底部发育厚套曲流河三角洲水下分流河道砂体,逐渐过渡为顶部薄层河口坝及远砂坝砂体与炭质泥岩及煤层互层(图 6)。

西区四个砂组均有发育,沉积厚度 90~285 m,沿 SE 方向,沉积微相展布为辫状河道—水下辫状河

道—河口坝—远砂坝及席状砂,砂地比逐渐降低。YL11、YL10 及 YL20 井Ⅰ砂组至Ⅱ砂组底主要沉积薄层水下辫状河道及河口坝砂体与煤层及炭质泥岩互层;Ⅱ砂组顶至Ⅲ砂组发育多期厚套辫状河道砂体,且厚套砂体常与暗色泥岩接触;Ⅳ砂组主要发育水下辫状河道砂体,砂体间常有炭质泥岩分布。YB205 及 YB2 在Ⅰ砂组顶、Ⅱ砂组底及Ⅲ砂组底发育厚套水下辫状河道砂体,期间夹薄层炭质泥岩。YB21 井炭质泥岩及煤层较为发育,Ⅰ砂组为薄层河口坝、远砂坝及席状砂砂体与炭质泥岩叠置;Ⅱ砂组沉积水下辫状河道砂体为主,夹薄层炭质泥岩及煤层;Ⅲ砂组以薄层水下辫状河道沉积为主,炭质泥岩零星分布。西区整体为辫状河三角洲前缘—平原—前缘的垂向相序递变规律,主体为辫状河道和水下辫状河道砂体与煤层及炭质泥岩垂向叠置,似“千层饼”状特征(图 7)。

综上所述,受龙门山北段及米仓山—大巴山双物源影响,东西区沉积相类型存在差异,东区发育曲流河三角洲前缘沉积,西区发育辫状河三角洲沉积。须三段整体处于湖侵的过程,东区物源供给速率低于可容空间增长速率导致砂体不断往北东方向收缩;西区表现为,Ⅰ至Ⅱ砂组物源供给速率大于可容空间增长速率导致砂体不断往盆内前积,Ⅲ至Ⅳ砂组物源供给速率小于可容空间增长速率导致砂体不断退积。由Ⅰ砂组至Ⅳ砂组,全区煤及炭质泥岩的厚度及沉积范围逐渐减小;西区整体煤及炭质泥岩与砂岩的叠置范围大于东区。东区垂向上为底部厚套水下分流河道储集砂体,顶部为薄层砂体与泥岩互层特征;西区垂向上为煤层及暗色炭质泥岩与辫状河道和水下辫状河道储集砂体垂向叠置,似“千层饼”状特征。

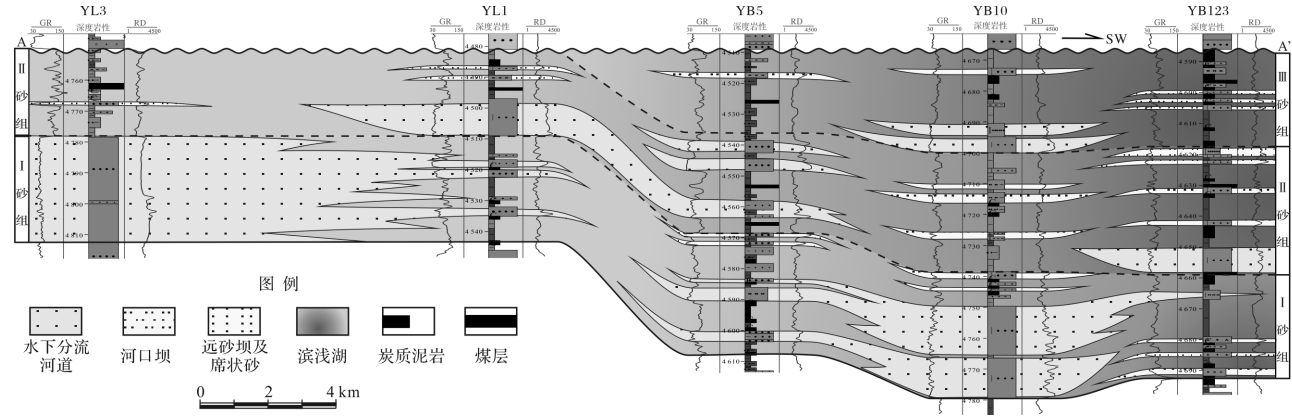


图 6 东区须三段沉积相垂向配置剖面图(平面位置见图 1B)

Fig.6 The profile of vertical facies configuration of T_3x^3 in the east area(Location of profile A—A' is shown in Fig.1B)

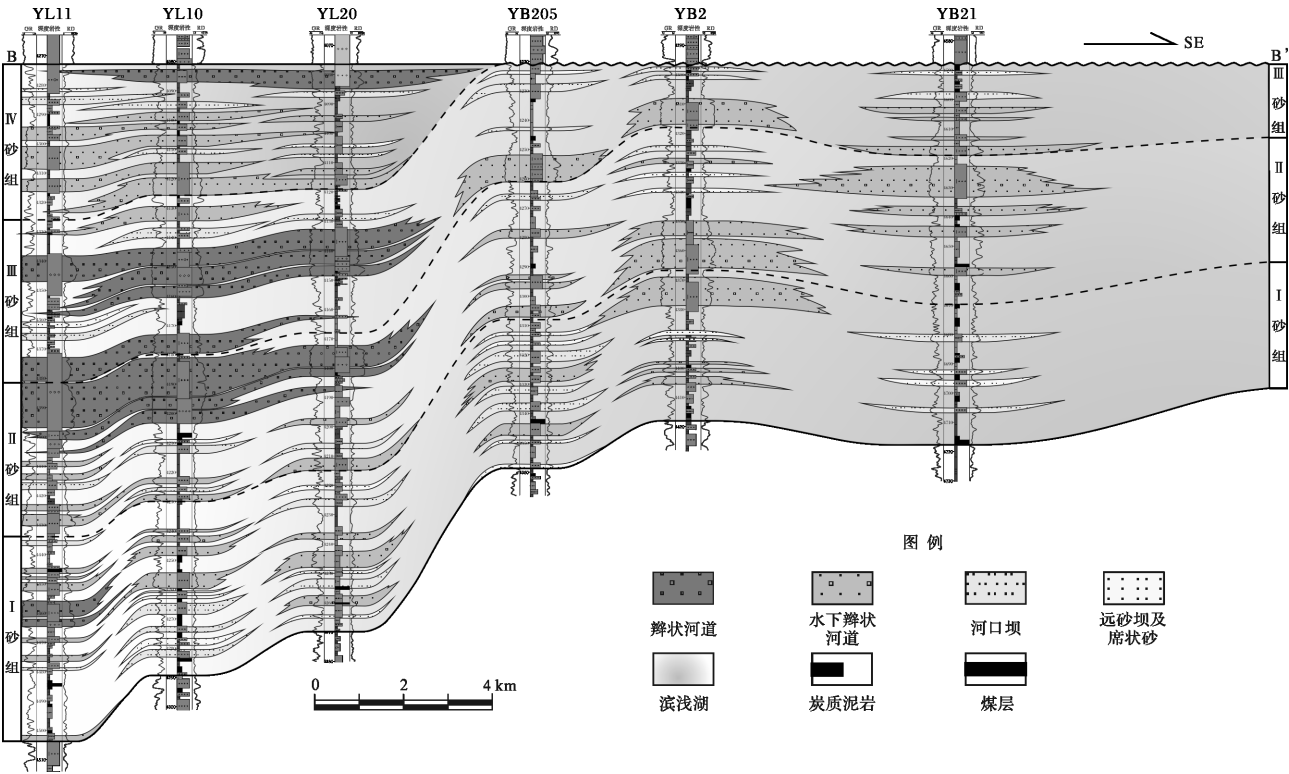


图 7 西区须三段沉积相垂向配置剖面图(平面位置见图 1B)

Fig.7 The profile of vertical facies configuration of T_3x^3 in the west area(Location of profile B—B' is shown in Fig.1B)

4 与致密砂岩气藏关系

长期研究认为,元坝地区须一段、须三段、须五段煤系烃源岩以Ⅲ型为主,生烃强度高,具有持续充注的气源条件,与须二段、须四段致密砂岩组成“三明治”式结构特征,是决定元坝地区致密气富集的关键。以下将对比识别须三段内有利储集相带,并明确东、西区煤及炭质泥岩与有利储集相带的配置特征,探讨须三段“源内”致密砂岩气藏的成藏条件。

4.1 有利储集相带

沉积微相的分布从宏观上控制着储层的分布及储集性能。根据 7 口井 131 个样品沉积微相与储层孔隙度的关系统计(图 8),其中辫状河道、水下辫状主河道及水下分流河道微相的平均孔隙度在 2% 以上,分布在 1.7%~7.7% 之间,主要集中于 3.0%~5.0% 之间,平均渗透率一般在 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,储集空间以粒间溶孔、黏土杂基微孔为主,局部发育裂缝;水下辫状次河道及河口坝微相的孔隙度在 1.5% 左右,平均渗透率低于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。总体来讲,水动力较强、沉积物分选相对较好、矿物成熟度相对较高的辫状河道、水下辫状主河道及水下分流

河道储集砂体为元坝地区须三段最有利的储集相带,水下辫状次河道及河口坝储集砂体次之。须三段试气结果证实了这一结论,辫状河道及水下辫状主河道储集砂体获得高产,水下辫状次河道及河口坝储集砂体获得低产(表 1)。

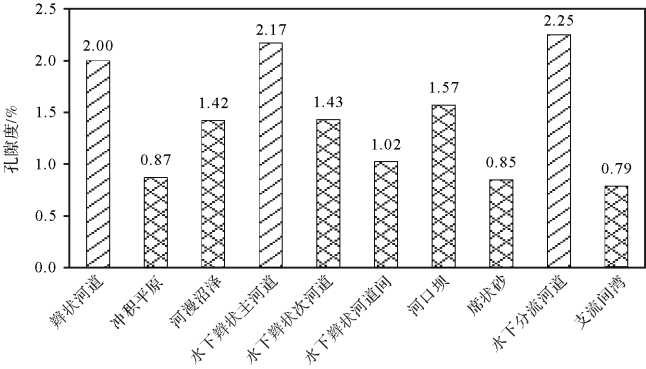


图 8 元坝地区须三段不同沉积微相孔隙度分布图

Fig.8 The distribution map of porosity in different microfacies of T_3x^3 in Yuanba area

4.2 烃源岩与有利储集相带配置关系

四川盆地须家河组储层致密化的时间发生在烃源岩生排烃高峰期前^[33],这一特征决定了天然气在

表 1 元坝地区须三段测试产气层段沉积微相特征统计表

Table 1 Statistical table of gas test result under different microfacies of T_3x^3 in Yuanba area

分区	井位	顶界	底界	单层砂体厚度	测试情况	相类型	砂组
		/m	/m	/m	/ $(10^4\text{m}^3/\text{d})$		
西区	元陆 7 井	3 461	3 471	9.6	120.8	水下辫状主河道	1 砂组
	元陆 10 井	4 144	4 155	10.0	22.56	辫状河道	3 砂组
	元陆 9 井	4 161	4212	10.0	10.02	水下辫状次河道	3-4 砂组
	元陆 8 井	4 350	4 380	10.0	3.89	水下辫状次河道	1-2 砂组
	元坝 2 井	3 781	3 802	5.8	1.06	水下辫状次河道-河口坝	1-2 砂组

横向上和纵向上的运移距离十分有限,因此在致密砂岩气成藏过程中,烃源岩与有利储集相带配置显得尤为重要。须三段沉积期东、西区物源供给体系的差异导致东、西区沉积相在平面和纵向上的配置存在差异性,进而东西区致密砂岩气的成藏模式及气藏分布存在差异。

东区底部为厚套的水下分流河道砂体,顶部为薄层的砂体与煤及炭质泥岩互层。厚套水下分流河道砂体与煤及炭质泥岩零星叠置,在致密化的储层中天然气零星充注,导致底部厚套水下分流河道砂体勘探潜力较差;而顶部薄层河口坝及水下分流河道前缘砂体与煤及炭质泥岩叠置,具有较多油气充注,但受限于储层储集性能,气藏规模较小(图 9a)。

西区水下辫状河道及辫状河道砂体分布范围广,

多层砂体叠置连片,西区砂体与煤系烃源岩构成互层,似“千层饼”状特征。相对于东区,西区源储更为紧邻,成藏条件更为有利。在广覆式生烃与大面积储集砂体的有效配置下,伴随着生烃增压^[34-35],天然气近距离垂向运移成藏,气藏呈多层叠置“斑块状”,平面连片特征(图 9b)。其中水下辫状河道砂体以储集性能好,与煤及炭质泥岩紧邻,具有最为可观的油气勘探前景。

5 结论

(1) 受控于龙门山北段及米仓山—大巴山构造活动的影响,东西区沉积相类型存在差异,东区发育曲流河三角洲前缘沉积,西区发育辫状河三角洲沉积。

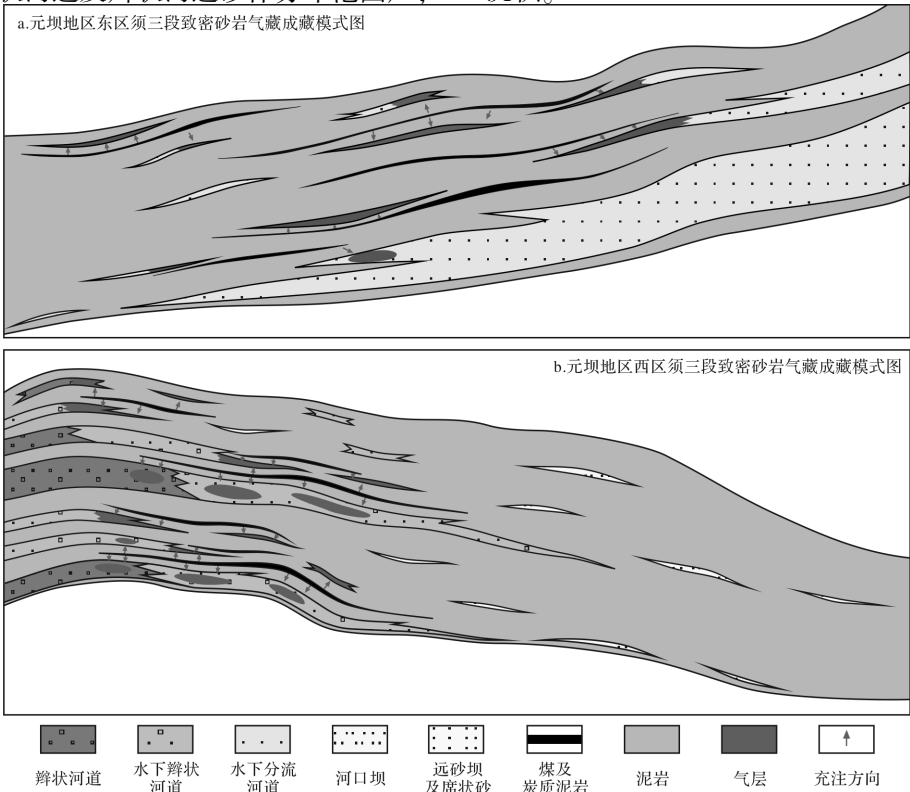


图 9 元坝地区东西区须三段成藏模式对比图

Fig.9 The comparison diagram between the east models of gas reservoir and the west of T_3x^3 in Yuanba area

(2) 水动力较强、沉积物分选相对较好、矿物成熟度相对较高的辫状河道、水下辫状主河道及水下分流河道沉积为元坝地区须三段最有利的储集相带。东区底部为厚套的水下分流河道砂体,顶部为薄层的砂体与煤及炭质泥岩互层,厚套水下分流河道砂体与煤及炭质泥岩零星叠置,在致密化的储层中天然气零星充注,导致底部厚套水下分流河道砂体勘探潜力较差;西区水下辫状河道及辫状河道砂体分布范围广,多层砂体叠置连片,西区砂体与煤系烃源岩构成互层,似“千层饼”状特征。相对于东区,西区源储配置特征,对于致密气成藏更为有利,勘探前景更为广阔。

参考文献 (References)

- Holditch S A. Tight gas sandstones[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2006, 58(6): 86-93.
- 杨涛,张国生,梁坤,等. 全球致密气勘探开发进展及中国发展趋势预测[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(6): 64-68, 76. [Yang Tao, Zhang Guosheng, Liang Kun, et al. The exploration of global tight sandstone gas and forecast of the development tendency in China[J]. *Engineering Sciences*, 2012, 14(6): 64-68, 76.]
- 邹才能,张国生,杨智,等. 非常规油气概念、特征、潜力及技术——兼论非常规油气地质学[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(4): 385-399. [Zou Caineng, Zhang Guosheng, Yang Zhi, et al. Geological concepts, characteristics, resource potential and key techniques of unconventional hydrocarbon: On unconventional petroleum geology[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(4): 385-399.]
- 李建忠,郭彬程,郑民,等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征与资源潜力[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 607-615. [Li Jianzhong, Guo Bingcheng, Zheng Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(4): 607-615.]
- British Petroleum Company. BP Statistical Review of World Energy 2013[R]. London: British Petroleum Company, 2013.
- Camp W K. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales: Discussion[J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(8): 1443-1447.
- Grechka V, Mazumdar P, Shapiro S A. Predicting permeability and gas production of hydraulically fractured tight sands from microseismic data[J]. *Geophysics*, 2010, 75(1): B1-B10.
- 吴小奇,黄士鹏,廖凤荣,等. 四川盆地须家河组及侏罗系煤成气碳同位素组成[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(4): 418-427. [Wu Xiaochi, Huang Shipeng, Liao Fengrong, et al. Carbon isotopic compositions of coal-derived gas in the Xujiahe Formation and Jurassic in the Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(4): 418-427.]
- 郭秋麟,李建忠,陈宁生,等. 四川合川—潼南地区须家河组致密砂岩气成藏模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(4): 409-417. [Guo Qiulin, Li Jianzhong, Chen Ningsheng, et al. Modeling of the tight sandstone gas accumulation for the Xujiahe Formation, Hechuan-Tongnan area, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(4): 409-417.]
- 王兰生,陈盛吉,杜敏,等. 四川盆地三叠系天然气地球化学特征及资源潜力分析[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(2): 222-228. [Wang Lansheng, Chen Shengji, Du Min, et al. Organic geochemistry characteristics and resources potential of Triassic natural gas in Sichuan Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(2): 222-228.]
- 张水昌,米敬奎,刘柳红,等. 中国致密砂岩煤成气藏地质特征及成藏过程——以鄂尔多斯盆地上古生界与四川盆地须家河组气藏为例[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(3): 320-329. [Zhang Shuichang, Mi Jingkui, Liu Lihong, et al. Geological features and formation of coal-formed tight sandstone gas pools in China: Cases from Upper Paleozoic gas pools, Ordos Basin and Xujiahe Formation gas pools, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(3): 320-329.]
- Dai J X, Ni Y Y, Zou C N. Stable carbon and hydrogen isotopes of natural gases sourced from the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin, China[J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 43: 103-111.
- 邹才能,陶士振,朱如凯,等. “连续型”气藏及其大气区形成机制与分布——以四川盆地上三叠统须家河组煤系大气区为例[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(3): 307-319. [Zou Caineng, Tao Shizhen, Zhu Rukai, et al. Formation and distribution of “continuous” gas reservoirs and their giant gas province: A case from the Upper Triassic Xujiahe Formation giant gas province, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(3): 307-319.]
- 赵文智,王红军,徐春春,等. 川中地区须家河组天然气藏大范围成藏机理与富集条件[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(2): 146-157. [Zhao Wenzhi, Wang Hongjun, Xu Chunchun, et al. Reservoir-forming mechanism and enrichment conditions of the extensive Xujiahe Formation gas reservoirs, central Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(2): 146-157.]
- 杨威,谢增业,金惠,等. 四川盆地上三叠统须家河组储层评价及天然气成藏机理[J]. *天然气工业*, 2010, 30(12): 10-15. [Yang Wei, Xie Zengye, Jin Hui, et al. Reservoir evaluation and pooling mechanism of the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(12): 10-15.]
- 朱如凯,白斌,刘柳红,等. 陆相层序地层学标准化研究和层序岩相古地理:以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. *地学前缘*, 2011, 18(4): 131-143. [Zhu Rukai, Bai Bin, Liu Lihong, et al. Research on standardization of continental sequence stratigraphy and palaeogeography: A case study from the Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 131-143.]
- 盘昌林,刘树根,马永生,等. 川东北须家河组储层特征及主控因素[J]. *西南石油大学学报:自然科学版*, 2011, 33(3): 27-34. [Pan Changlin, Liu Shugen, Ma Yongsheng, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Xujiahe Formation in north-eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2011, 33(3): 27-34.]
- 翟文亮,郑荣才,朱如凯,等. 川东北类前陆盆地须家河期盆—山耦合和层序充填样式[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2009,

- 36(3):268-275. [Zhai Wenliang, Zheng Rongcai, Zhu Rukai, et al. Basin-range coupling and sequence filling patterns of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the northeastern Sichuan analogous foreland basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2009, 36(3): 268-275.]
- 19 钟怡江. 川东北长兴期—须家河期构造—沉积演化[D]. 成都:成都理工大学, 2012. [Zhong Yijiang. Sedimentary structural evolution of northeastern Sichuan Basin from Changxing to Xujiahe Period[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.]
- 20 陈洪德, 郭彤楼. 中上扬子叠合盆地沉积充填过程与物质分布规律[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 213-300. [Chen Hongde, Guo Tonglou. The Process of Deposition and Filling and the Distribution Law of the Superimposed Basin in Upper and Middle Yangtze Platform [M]. Beijing: Science Press, 2012: 213-300.]
- 21 高红灿, 郑荣才, 柯光明, 等. 川东北前陆盆地须家河组层序——岩相古地理特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2005, 25(3): 38-45. [Gao Hongcan, Zheng Rongcai, Ke Guangming, et al. The Upper Triassic Xujiahe Formation in the northeastern Sichuan foreland basin: Sequence-based sedimentary facies and palaeogeography[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2005, 25(3): 38-45.]
- 22 谢继容, 李国辉, 唐大海. 四川盆地上三叠统须家河组物源供给体系分析[J]. 天然气勘探与开发, 2006, 29(4): 1-3, 13. [Xie Jirong, Li Guohui, Tang Dahai. Analysis on provenance-supply system of Upper Triassic Xujiahe Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2006, 29(4): 1-3, 13.]
- 23 郑荣才, 戴朝成, 朱如凯, 等. 四川类前陆盆地须家河组层序—岩相古地理特征[J]. 地质论评, 2012, 55(4): 484-495. [Zheng Rongcai, Dai Chaocheng, Zhu Rukai, et al. Sequence based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Geological Review, 2012, 55(4): 484-495.]
- 24 毛琼, 郑荣才, 邹光富, 等. 川东北前陆盆地上三叠统沉积相及沉积演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2012, 32(1): 1-11. [Mao Qiong, Zheng Rongcai, Zou Guangfu, et al. Upper Triassic sedimentary facies and sedimentary evolution in the northeastern Sichuan foreland basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2012, 32(1): 1-11.]
- 25 淡永. 川东北须家河组物源分析与沉积体系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011. [Dan Yong. Analyses of the provenance and the depositional systems of Xujiahe Formation in northeast of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.]
- 26 姜在兴, 田继军, 陈桂菊, 等. 川西前陆盆地上三叠统沉积特征[J]. 古地理学报, 2007, 9(2): 143-154. [Jiang Zaixing, Tian Jijun, Chen Guiju, et al. Sedimentary characteristics of the Upper Triassic in western Sichuan foreland basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2007, 9(2): 143-154.]
- 27 郑荣才, 李国辉, 雷光明, 等. 四川盆地须家河组层序分析与地层对比[J]. 天然气工业, 2011, 31(6): 12-20. [Zheng Rongcai, Li Guohui, Lei Guangming, et al. Sequence analysis and stratigraphic correlation of the Xujiahe Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(6): 12-20.]
- 28 郑荣才, 朱如凯, 戴朝成, 等. 川东北类前陆盆地须家河组盆—山耦合过程的沉积-层序特征[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1077-1087. [Zheng Rongcai, Zhu Rukai, Dai Chaocheng, et al. Depositional sequence features during coupling process between basin and mountain of the Xujiahe Formation of Upper Triassic in the foreland basin, NE Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(8): 1077-1087.]
- 29 黎静容, 李毓, 程洪亮, 等. 元坝地区须三段沉积特征[J]. 西安石油大学: 自然科学版, 2013, 28(5): 43-50. [Li Jingrong, Li Yu, Cheng Hongliang, et al. Sedimentary characteristics of third member of Xujiahe Formation in Yuanba area[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2013, 28(5): 43-50.]
- 30 施振生, 杨威, 谢增业, 等. 四川盆地晚三叠世碎屑组相对源区分析及印支运动的指示[J]. 地质学报, 2010, 84(3): 387-397. [Shi Zhensheng, Yang Wei, Xie Zengye, et al. Upper Triassic clastic composition in Sichuan Basin, Southwest China: implication for provenance analysis and the Indosinian Orogeny[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(3): 387-397.]
- 31 王金琪. 安县构造运动[J]. 石油与天然气地质, 1990, 11(3): 223-234. [Wang Jinqi. Anxian tectonic movement[J]. Oil & Gas Geology, 1990, 11(3): 223-234.]
- 32 王金琪. 龙门山印支运动主幕辨析——再论安县构造运动[J]. 四川地质学报, 2003, 23(2): 65-69. [Wang Jinqi. Recognition on the main episode of Indo-China movement in the Longmen Mountains—A re-review on the Anxian tectonic movement[J]. Acta Geologica Sichuan, 2003, 23(2): 65-69.]
- 33 朱如凯, 邹才能, 张翥, 等. 致密砂岩气藏储层成岩流体演化与致密成因机理——以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2009, 39(3): 327-339. [Zhu Rukai, Zou Caineng, Zhang Nai, et al. Diagenetic fluids evolution and genetic mechanism of tight sandstone gas reservoirs in Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2008, 39(3): 327-339.]
- 34 孙琦, 李天义, 周雁, 等. 川东北 YB 地区陆相地层超压特征及压力预测[J]. 石油实验地质, 2012, 34(6): 611-616, 622. [Sun Qi, Li Tianyi, Zhou Yan, et al. Characteristics and prediction of overpressure in continental strata, YB area, northeastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(6): 611-616, 622.]
- 35 李军, 邹华耀, 张国常, 等. 川东北地区须家河组致密砂岩气藏异常高压成因[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(3): 624-633. [Li Jun, Zou Huayao, Zhang Guochang, et al. Origins of overpressure tight gas reservoirs in the Xujiahe Formation, northeastern Sichuan Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(3): 624-633.]

Sedimentary Characteristics and Their Relationship with Tight Sandstone Gas within the Source Rock of Tight Gas: A case study from Third Member of Xujiahe Formation in Yuanba area, NE Sichuan Basin

TANG JianRong^{1,2} WANG JinYou³ ZHANG ChengCheng^{1,2} SONG GuangZeng^{1,2}
SHI Yingtao^{1,2} ZHANG Lei⁴

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geoscience, Wuhan 430074;

2. MOE Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074;

3. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580;

4. College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract: The third member of Xujiahe Formation has been considered the source rocks. However, the well obtained $120.8 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ yield in gas production of the member, showing the exploration prospect being bright within the source rock of tight gas, especially in the third member of Xujiahe Formation. This article aims to use the multi-information integrated research method, to elaborately analyze sedimentary microfacies, features and sediment evolution of different sand groups, and characterize their relation with tight gas sandstone reservoir, based on the data of drilling cores, loggings and analysis assay. The result shows that braided fluvial delta was developed in the west of the study area and meandering fluvial delta was developed in the east. Among those different microfacies, braided channel, subaqueous braided main channel and subaqueous distributary channel are relatively favorable reservoirs. Meanwhile, the difference of east and west sedimentary facies configuration are obvious. In the east, thick set of subaqueous distributary channel reservoirs are distributed at the bottom, and thin set of sandstone and coal bed superimposed each other at the top. In the west, the distribution of braided channel and subaqueous braided channel sandstone are widely and stacked. And carbonaceous mudstone and coal bed with sandstone superimposed each other, appearing as a “thousand layers cake” like stacking pattern. Comparing to the east, the source rock and reservoir are closely proximity, so the west has favorable accumulation condition. The present study suggested that the future exploration would be focused on the west.

Key words: Yuanba area; tight sandstone gas reservoir; sedimentary facies; sediment evolution; configuration of source and reservoir