

饶阳凹陷沙河街组辫状河三角洲 沉积特征及储集性

张 大 智^{1,2} 纪 友 亮³ 韩 春 元⁴ 初 丽 兰⁵ 倪 超²

(1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 3. 中国石油大学, 北京 102249; 4. 中国石油华北油田公司, 河北 任丘 062552; 5. 大庆油田勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要: 饶阳凹陷沙河街组主要为砾岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂岩和泥岩构成的一套碎屑岩组合, 根据沉积特征将其确定为辫状河三角洲沉积。该沉积三层结构清楚, 由下而上出现前辫状河三角洲亚相、辫状河三角洲前缘亚相及辫状河三角洲平原亚相, 呈明显的进积层序, 主要发育辫状河道、洪泛平原、水下分流河道、水下分流河道间、河口坝和席状砂等沉积微相。据其岩性、沉积构造、粒度及沉积序列等特征, 建立了沉积模式。从岩性特征看, 沙河街组辫状河三角洲沉积物具有分布较广、储集物性较好的特点, 辫状河三角洲前缘水下分流河道砂体和河口坝砂体储集物性最好, 是下一步勘探的有利目标。

关键词: 饶阳凹陷; 沙河街组; 辫状河三角洲; 沉积模式; 储集性

中图分类号: P588.21⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2009)02-0344-11

1 地质背景

饶阳凹陷位于冀中拗陷中部, 是它的一个次级构造单元, 北接霸县凹陷, 南临新河凸起, 东面与献县凸起相临, 西到高阳低凸起, 面积约 6300 km² (图 1), 是冀中拗陷最大的凹陷, 也是油气最富集、勘探成效最高的凹陷^[1-3]。

沙河街组是古近系的一套沉积地层, 自下而上分为沙四段、沙三下亚段、沙三中亚段、沙三上亚段、沙二段和沙一段 (表 1)。沉积演化研究表明^[4], 沙四段处于断陷分割期, 具有多物源、近物源、多中心和湖域小、水体连通较差的特点, 在湖盆缓坡发育辫状河三角洲沉积; 在沙三段早中期, 边界同沉积断裂发育, 凹陷快速下沉, 形成广湖盆、深水体和东西分带的沉积局面, 在东部陡坡以扇三角洲沉积为主, 而在西部缓坡辫状河三角洲沉积广泛发育; 沙三段晚期, 拉张断陷活动逐渐减弱, 而断陷抬升、振荡作用相对增强, 具

有湖域小、水体浅、岩性粗等特征, 钻井显示全区以砂砾岩夹灰、灰绿色泥岩组成的粗剖面为特征, 平面上发育辫状河三角洲、扇三角洲及湖湘沉积; 进入沙二段发育期, 区域抬升作用继续加强, 在区内以砂砾岩夹红色泥岩沉积为主, 冲积扇、辫状河及辫状河三角洲发育广泛; 沙一段早期, 断陷抬升作用开始减弱, 进入拗陷沉积阶段, 地形较为平坦, 整个凹陷快速下沉, 加之温暖湿润的气候环境, 发生大规模的湖侵, 但持续时间较短, 水体不深, 发育一套深灰色泥岩、油页岩、钙质砂岩等为特征的岩性组合。到沙一段晚期, 大规模辫状河三角洲由凹陷边缘向中部湖区推进, 以辫状河三角洲前缘沉积为主。因此, 沙河街组处于盆地断陷活动由强到弱时期, 在湖盆边缘大量发育辫状河三角洲相。对于本区的辫状河三角洲沉积特征, 还缺乏详细、系统的论述, 因此, 笔者通过研究其沉积标志、相类型, 建立了沉积模式, 分析了砂体储集性, 以期对沙河街组下步勘探提供有益的借鉴。

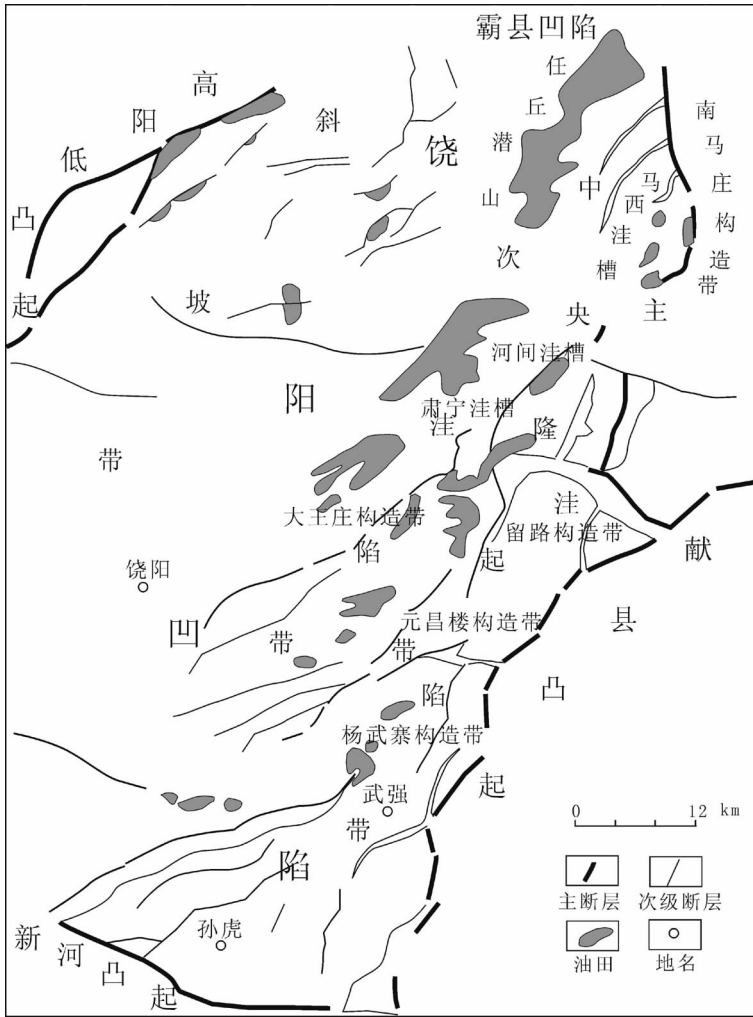


图 1 饶阳凹陷构造位置图

Fig.1 Structural location of Raoyang Sag

表 1 饶阳凹陷沙河街组地层划分

Table 1 Stratigraphic division of Shahejie Formation in Raoyang Sag

系	组	地层		地震反射界面	与下伏地层接触关系	构造演化阶段
		段	亚段			
古近系	沙河街组	沙一段		T ₄	上超	断拗抬升消亡期
		沙二段		T ₅	局部不整合	
		沙三段	沙三上亚段	T ₆₋₁	不整合	断陷扩张深陷期
			沙三中亚段	T ₆₋₂	不整合	
		沙三下亚段	T ₆	不整合		
	沙四段		T ₇	角度不整合	断陷分割充填期	

2 辫状河三角洲沉积标志

2.1 岩性特征

本区沙河街组辫状河三角洲沉积体系物源供给

充分、沉积速度快,因此,沉积厚度大,单个砂体厚度最大可达 40 m。主要由灰白色、浅灰色、紫红色泥岩夹厚层的砂砾岩、含砾砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥质粉细砂岩组成(图 2),反映了辫状河三角洲沉积时

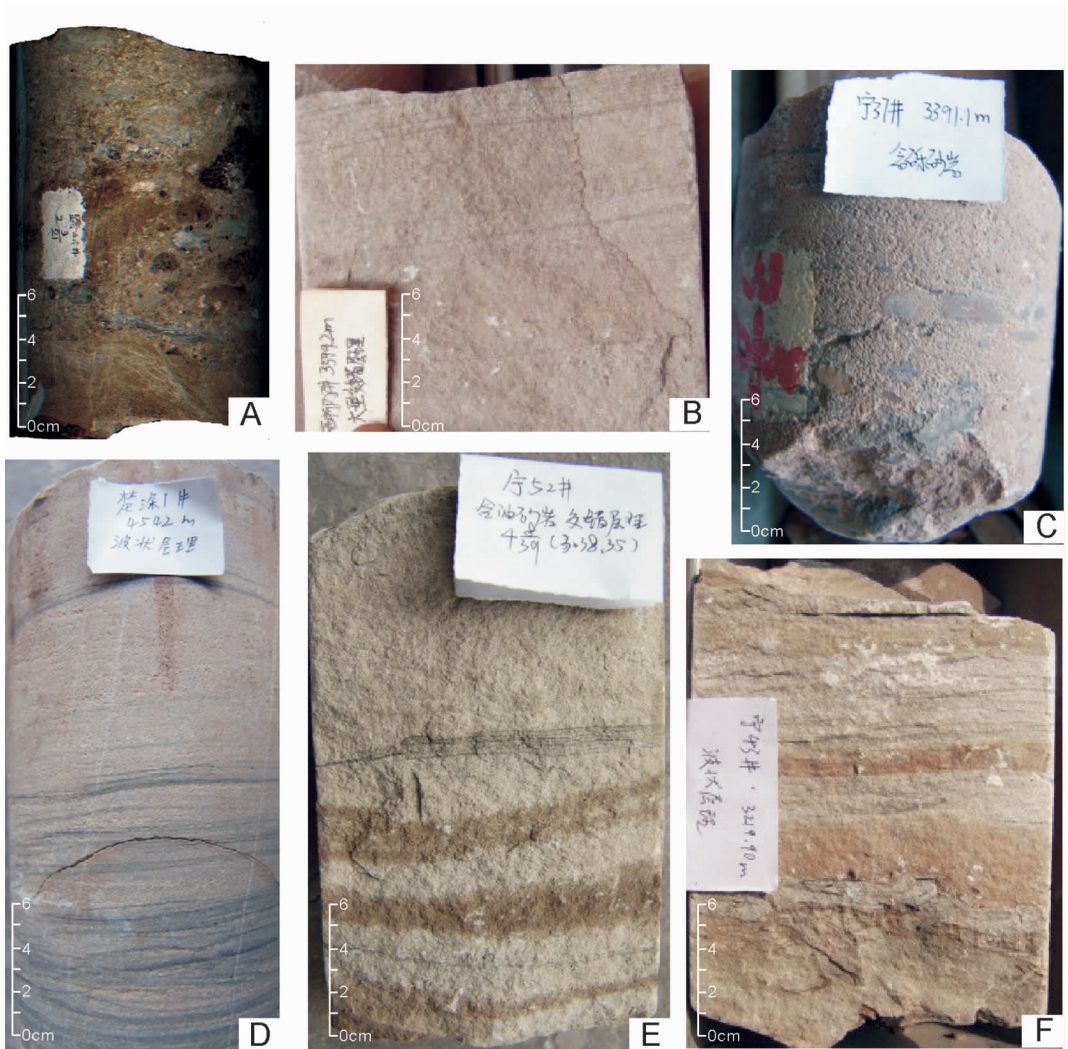


图 2 沙河街组辫状河三角洲的沉积特征岩心照片

A—路 44 井,沙三上亚段,3154.2 m,油浸,含砾中砂岩,突变接触,水下分流河道微相沉积; B—西柳 8 井,沙二亚段,3599.2 m,交错层理,中砂岩,河口坝微相沉积; C—宁 37 井,沙一段,3391.1 m,含砾粗砂岩,辫状河道微相沉积; D—楚深 1 井,沙三上亚段,4542.2 m,波状层理,细砂岩,席状砂微相沉积; E—宁 52 井,沙一段,3038.4 m,交错层理,油浸,中砂岩,席状砂微相沉积; F—宁 43 井,沙一段,3219.9 m,波状层理,冲刷面,中砂岩,水下分流河道微相沉积

Fig.2 Core photographs showing sedimentary characteristics of braided river delta of Shahejie Formation
A—Well Lu 44, upper part of 3rd Member of Shahejie Formation, 3154.2 m, oil inrush, pebbled medium-grained sandstone, abrupt contact, sediments of subaqueous distributary channel; B—Well Xiliu 8, 2nd Member of Shahejie Formation, 3599.2 m, cross-bedding, medium-grained sandstone, mouth bar; C—Well Ning 37, 1st Member of Shahejie Formation, 3391.1m, pebbled grit, sediments of braided distributary channel; D—Well Chushen 1, upper part of 3rd Member of Shahejie Formation, 4542.2 m, undulate bedding, fine-grained sandstone, sheet bar; E—Well Ning 52, 1st Member of Shahejie Formation, 3038.4 m, cross-bedding, oil inrush, medium-grained sandstone, sheet bar; F—Well Ning 43, 1st Member of Shahejie Formation, 3219.9 m, undulate bedding, erosion surface, medium-grained sandstone, sediments of subaqueous distributary channel

期水体比较浅、比较动荡的特点。

2.2 沉积构造特征

牵引流是指碎屑物质以床沙形式搬运为主、悬浮搬运为次的一种水流状态,是河流及辫状河三角洲沉积体系最主要的搬运形式^[4-6]。在沙河街组辫状河三角洲沉积体系中,反映牵引流沉积作用的层理类型很发育,主要有大中型楔状交错层理、板状交错

层理、平行层理、小型交错层理、波状层理等,以及凹凸不平的冲刷构造、再沉积的泥砾等(图 2)。

2.3 成熟度特征

由于山区辫状河流程短,携带的大量碎屑物质很快堆积下来,使得辫状河三角洲的沉积物较粗,成熟度中等或较低^[6]。由分析资料可知(表 2,图 3),沙河街组辫状河三角洲岩石类型以灰白色岩屑中-细砂岩

表 2 沙河街组辫状河三角洲储层岩性特征统计
Table 2 Statistics of reservoir lithologic characteristics of braided river delta of Shahejie Formation

层位	地区	岩石类型	平均陆源碎屑 (%)			平均主要填隙物 (%)			分选性	磨圆度	代表井
			石英	长石	岩屑	泥质	方解石	白云石			
沙一段	留西	中-细长石砂岩	52.0	39.0	8.8	4.8	12.1		好	次圆	留475
	河间	中-细长石砂岩	43.4	51.2	5.6	1.7	1.3		中	次棱-次圆	间3
	肃宁	中-细长石砂岩	49.8	39.9	7.4	2.6	14.8	2.0	中	次棱-次圆	宁636
沙二段	马西	中-细长石砂岩	37.4	48.2	12.8	0.8	4.1	1.5	中	次棱-次圆	西48
沙三段	大王庄	中长石砂岩	52.5	42.3	7.3	4.9	0.3	5.1	中	次棱-次圆	留492
	马西	中长石砂岩	42.4	36.1	16.4	7.6	6.8	3.3	差	次棱-次圆	马86
	留楚	中长石砂岩	57.2	29.8	11.3	4.2	1.7	5.7	差	次棱-次圆	楚22
沙四段	雁翎	中-粗长石砂岩	41.9	42.4	13.1	12.8	0.6	0.2	差	棱状	雁深1

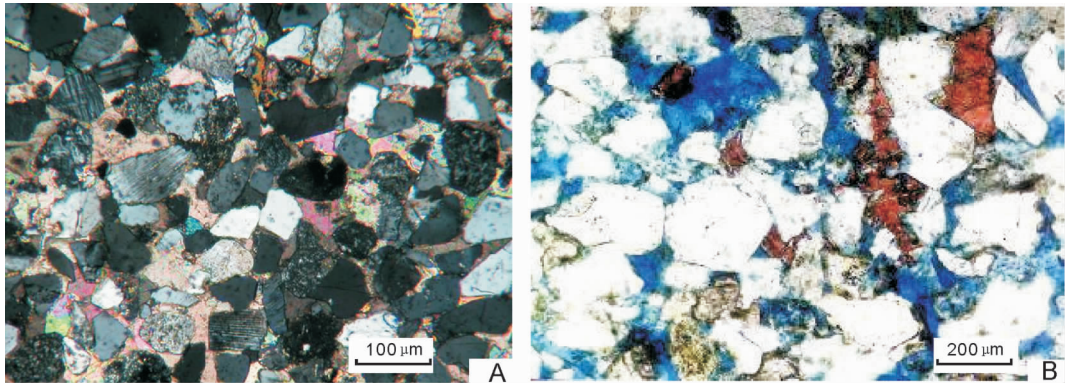


图 3 显微镜下沙河街组辫状河三角洲沉积特征

A—马 19 井, 2137 m, 沙三上亚段, 长石细砂岩, 方解石呈嵌晶式胶结并交代长石颗粒; B—强 50 井, 3013.1 m, 沙二段, 长石细砂岩, 方解石胶结物溶蚀形成粒间溶孔, 石英次生加大

Fig.3 Microphotographs showing sedimentary characteristics of braided river delta of Shahejie Formation A—Well Ma 19, 2137m, upper part of 3rd Member of Shahejie Formation, feldspar-porphry fine-grained sandstone, calcite poikilitic cement that replaced feldspar; B—Well Qiang 50, 3013.1m, 2nd Member of Shahejie Formation, feldspar-porphry fine-grained sandstone, the dissolution of calcite cement responsible for the intergranular pores and the secondary overgrowth of quartz

和粗粒长石砂岩为主,分选中等,少数砂岩分选差;磨圆度中等,一般为次棱角、次圆状。大部分样品中石英含量大于 40%,长石含量略低,岩屑含量较低。

2.4 粒度分布特征

本区辫状河三角洲的粒度概率曲线有多种类型,是由于沉积时期水动力条件不同造成的,主要有以下 4 种:

I 型(图 4-a):为一条弯曲的斜线,斜率 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,主要为悬浮总体。反映快速沉积、分选性较差的重力流搬运方式。体现辫状河道和下水分流河道底部具块状层理的含砾砂岩的沉积特点。

II 型(图 4-b):为三段式。滚动组分含量低($< 10\%$),跳跃总体含量为 $20\%\sim 80\%$,斜率 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$,细截点 $2\sim 3\phi$,反映分选中等偏好、以牵引流为主的搬运方式,体现水下分流河道中上部具板状交错层理砂岩的沉积特点。

III 型(图 4-c):由跳跃总体和悬浮总体组成的两段式。跳跃总体含量为 $20\%\sim 45\%$,斜率 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$,细截点为 $1\sim 2\phi$,分选性较好;悬浮总体分选差,斜率为 $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。体现水下分流河道上部具不规则交错层理泥质砂岩的沉积特点。

IV 型(图 4-d):为两段式。跳跃总体一般为 40%

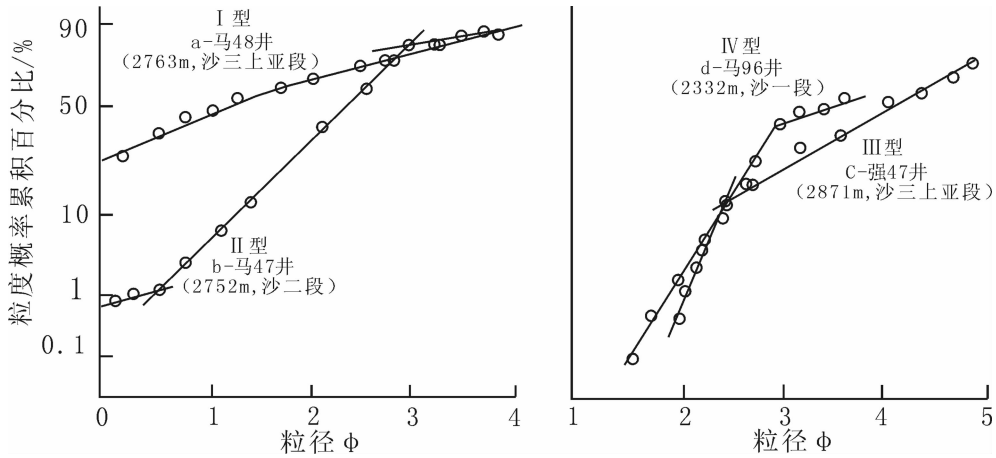


图4 沙河街组辫状河三角洲粒度概率曲线特征

Fig.4 Characteristics of grain-probability curve of braided river delta of Shahejie Formation

~55%,斜率 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$,细截点为 3ϕ ,反映了粒级细,分选好,反映具小型交错层理的席状砂相细砂岩的沉积特征。

2.5 地震反射特征

地震反射特征受沉积物沉积时的构造背景、地形起伏和水动力条件控制。从邻近物源到深水湖盆,依次为辫状河三角洲平原亚相、辫状河三角洲前缘亚相、前辫状河三角洲亚相,地震相表现为低频弱振幅斜交充填地震相、杂乱弱振幅块状相→丘状充填相、斜交充填相、丘状相、楔状相→中高频连续、较连续席状相的变化规律,反映了高能沉积环境到低能沉积环境的过渡。

3 辫状河三角洲沉积相类型

自从辫状河三角洲概念的提出,就引起了国内外油气地质学家的重视,并分别从不同角度对其进行了研究^[7-11]。结合前人的研究成果,根据饶阳凹陷具体沉积特征及水动力条件等资料,认为沙河街组发育辫状河三角洲平原、辫状河三角洲前缘、前辫状河三角洲等可分为3个亚相、7个微相类型。

3.1 辫状河三角洲平原亚相

位于湖盆边缘辫状河大量分叉处与湖岸线之间的陆上沉积区^[9],在本区主要分布于凹陷边缘,以辫状河道微相为主,局部发育洪泛平原、河间洼地等微相(图5)。

(1)辫状河道。岩性为杂色和紫红色块状中粗砂

岩夹薄层砂质细砾岩、含砾砂岩和含砾泥质砂岩与泥岩。砂砾岩分选、磨圆度较差,以次圆-次棱状为主,泥质含量少。在剖面上显示为块状韵律层序,局部显示底部冲刷、向上变细的正韵律。发育块状层理,可见不规则交错层理、楔状交错层理和滑塌变形层理。自然电位曲线呈箱形和钟形。

(2)洪泛平原。岩性为紫红色泥岩、含砾泥岩、浅灰色泥质粉砂岩与杂色含砾砂岩。砂岩占地层厚度10%~35%,红色泥岩占地层总厚30%~85%。可见小型不规则交错层理及冲刷构造,偶见碳化植物碎片。

(3)河间洼地。位于辫状河三角洲平原的相对低洼部位,由洪水期洼地积水而成,范围一般较小。岩性为浅灰、深灰色、砂质、钙质泥岩、泥质粉砂岩和薄层粉细砂岩。泥岩呈块状,可见炭屑。砂岩发育小型交错层理,沿层面碳化植物碎片和碳化植物茎多见。

3.2 辫状河三角洲前缘亚相

辫状河三角洲前缘位于平原外侧的向湖方向,处于湖岸线以下,为河流与湖水的共同作用带,沉积作用活跃^[9],是本区主要沉积相类型,由水下分流河道、水下分流河道间、河口坝及席状砂等微相组成(图6)。

(1)水下分流河道。岩性为砂质细砾岩、含砾砂岩、粉细砂岩与灰色泥岩组成,偶夹炭质泥岩。砂砾岩单层厚度5~15 m,占地层总厚的45%~55%。岩石类型主要为长石砂岩,砂岩成分成熟度中等。分选中等,次棱-次圆状为主。相序多为不完整的正韵律,

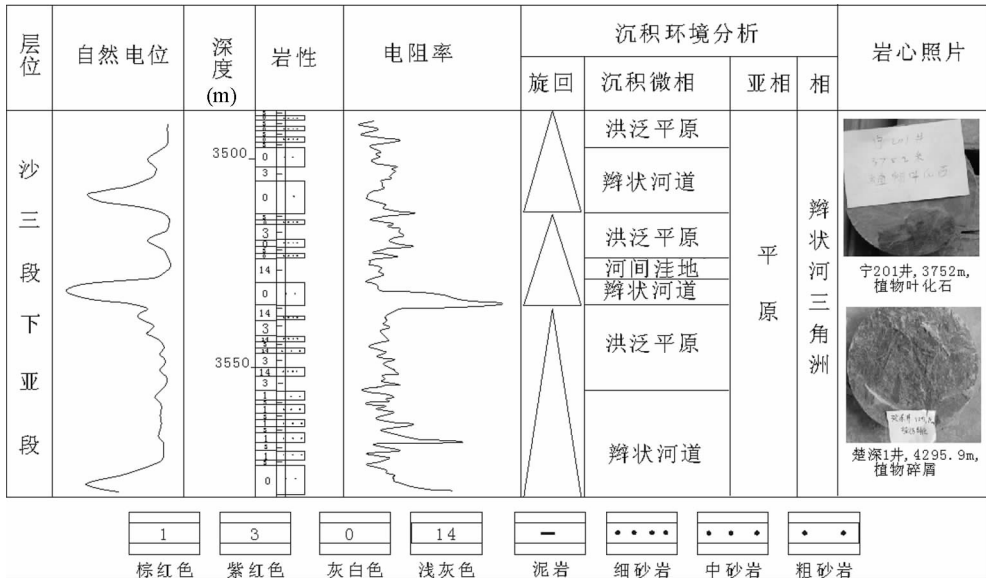


图 5 辫状河三角洲平原亚相单井综合分析(文 37 井)

Fig.5 Integrated analysis of braided river delta plain subfacies of Well Wen 37

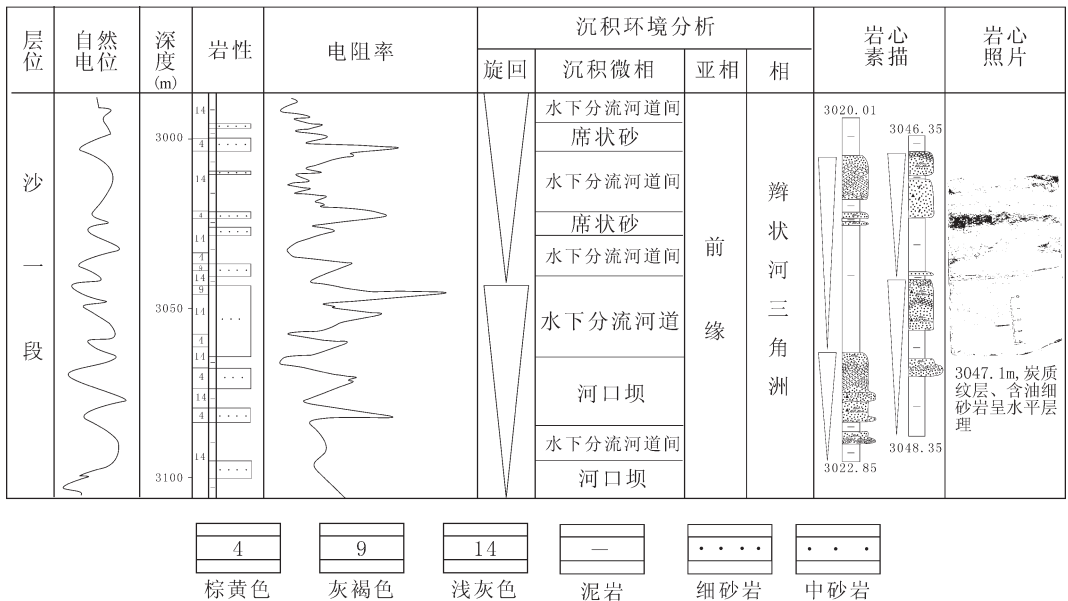


图 6 辫状河三角洲前缘亚相单井综合分析(宁 52 井)

Fig.6 Integrated analysis of braided river delta front subfacies of Well Ning 52

底部冲刷接触,顶部突变或渐变,发育交错层理、块状层理、平行层理、小型板状交错层理、波状层理及冲刷构造,并见有层内变形构造。自然电位曲线形态以箱形和钟形为主,向上细齿增加。

(2)水下分流河道间。主要由灰色、灰绿色泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及少量粉砂岩组成,分选一般较差,有漂浮结构和似斑状结构,这是洪水期间沉

积物从水下分流河道中溢出所致。主要层理构造为波状层理、小型交错层理及透镜状层理,局部可见生物扰动和潜穴构造。

(3)河口坝。位于河口分叉处,自下而上主要为泥质粉砂岩、粉砂岩和中细砂岩与灰色泥岩交互组成的反韵律或复合韵律,底部渐变接触,顶部突变接触。单砂层厚度 3~10 m,占地层厚度 33%~55%。砂岩

类型主要为长石砂岩,泥质含量低,分选性和磨圆度较好。主要发育板状交错层理、小型交错层理和块状层理。自然电位曲线为漏斗形。

(4)席状砂。中厚层粉砂、细砂岩与灰色泥岩不等厚互层,沉积层序常见反韵律。砂岩类型主要为岩屑长石砂岩,其次为长石砂岩,分选中等偏好,次圆状。说明砂岩搬运距离比较长,成分成熟度和结构成熟度较高。砂岩中发育不规则交错层理,粉细砂岩中见水平层理、小型交错层理、波状层理和波状水平层理。砂体骨架形态平面为席状,剖面呈带状和楔状。自然电位曲线为漏斗形。

3.3 前辫状河三角洲亚相

前辫状河三角洲位于辫状河三角洲前缘向湖的较深水区,沉积物大多是在波基面以下形成的^[6],岩性为灰、深灰色泥岩、粉砂质泥岩。发育水平层理、波状层理。地震相为高频连续平行结构席状相,代表一套水体较深的稳定沉积,属辫状河三角洲的底积层,

与湖相不易区分。

4 辫状河三角洲沉积模式

在饶阳凹陷,自物源区到深水湖盆,辫状河三角洲与湖泊呈现一套完整的沉积体系。在形成过程中,由于地形地貌、形成机理和水动力条件的不同,不同区域的岩性岩相特征、沉积序列及地震响应均发生变化^[2]。岩性表现为杂色块状中粗砂岩、砾岩夹薄层红色泥岩、含砾泥岩→中细砂岩夹浅灰、绿灰色泥岩→细砂岩、含砾泥质砂岩与灰色泥岩互层→大段深灰色泥岩夹薄层粉细砂岩的变化过程。砂岩单层厚度逐渐减薄,占地层厚度百分比逐渐降低。砂岩结构成熟度和成份成熟度由低变高,沉积构造和地震相显示规律性变化,反映高能环境向低能环境的过渡,体现了水动力条件由强变弱的过程。

根据本区辫状河三角洲发育特征,对沉积模式进行了总结(图7)。在辫状河三角洲平原亚相区,地

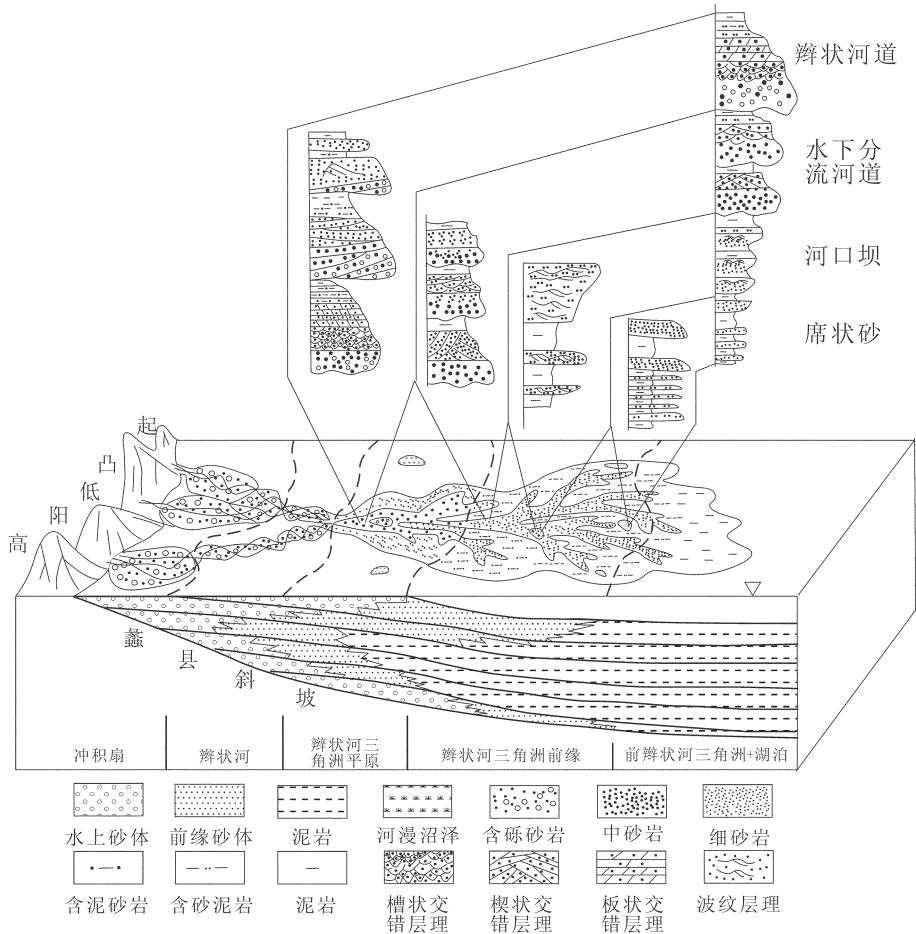


图7 沙河街组辫状河三角洲沉积模式

Fig.7 Sedimentary model for braided river delta of Shahejie Formation

形宽阔,往往与小而多的冲积扇群相接,辫状河道和洪泛平原是主要微相。辫状河属高能快速沉积环境,河道在平面上频繁改道、合并和废弃,河床宽达几千米,受季节性洪水作用控制,砂砾岩体横向变化快。洪泛平原主要在特大山洪期接受沉积,呈楔状裙边形。在低洼地带长期积水,植被丛生,从而形成河间洼地。辫河三角洲前缘亚相在本区分布面积较广,大量粗碎屑物质在河流入湖处形成扇形或树枝状砂砾岩体,主要发育水下分流河道、河口坝和席状砂等微相。水下分流河道水动力条件强,主要沉积细砾岩和中砂岩等粗粒沉积物,剖面上以不完整的正韵律叠置层为特点。河口坝分布范围小,主要分布在河道分流处,岩性以细砂岩为主,主要为反粒序叠置层。席状砂水动力条件最弱,砂层单层薄,粒级细,与湖相泥岩组成反韵律叠置层。前辫状河三角洲主要为泥岩和粉、细砂质泥岩沉积,很难与湖相沉积区分。

5 辫状河三角洲储集性能

饶阳凹陷沙河街组储集空间有原生孔隙和次生孔隙两种成因类型,根据孔隙形态将其划分为原生粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔、缩小粒间孔、晶间孔等 6 种孔隙类型。不同的孔隙组合构成不同的储层类型^[13-14],由表 3 可看出,沙河街组辫状河三角洲各微相储层大都具有中高孔中渗的特点,辫状河道微相的储集性能最好,席状砂的储集性能较好,水下分流河道储集性能一般。

以饶阳凹陷东北部马西地区的沙二段为例来具体分析辫状河三角洲的储集性。通过该区 23 口井的

岩性特征、测井特征、岩心观察及地震相分析,认为该区沙二段发育进积型辫状河三角洲砂体,形态为朵状,其物源主要来自东部,自东向西,砂岩厚度占地层厚度比值逐渐降低,粒级逐渐变细,石英含量为 37%~58%,最高达 64%,成熟度逐渐增高。可见交错层理、平行层理、变形层理和冲刷面等沉积构造,发育有辫状河道、水下分流河道、河口坝和席状砂等沉积微相(图 8)。

对于不同微相,其储集性差别较大。砂岩物性统计结果表明,席状砂和河口坝砂岩储集物性较好,孔隙度一般为 12%~18%,最高可达 23.8%,渗透率一般为 $22.1 \times 10^{-3} \sim 139.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最高可达 $2650 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。录井显示也反映了这一点,其油气显示级别以含油、油侵、油斑和油迹为主,显示层累计厚度一般为 20~40 m,最厚为 61 m,试油大多获工业油流。水下分流河道和水下分流河道间储集性一般,显示层累计厚度小,一般小于 15 m,显示级别较低,少数为油斑和油迹。因此,马西地区的席状砂和河口坝砂体,是下一步勘探的有利储集体。

6 初步结论

(1) 饶阳凹陷沙河街组发育辫状河三角洲沉积,沉积特点介于扇三角洲和三角洲之间。以牵引流沉积特征为主,沉积物搬运距离短,粒度粗,成分成熟度和结构成熟度中等或较差,发育交错层理、平行层理、波状层理等。

(2) 根据辫状河三角洲沉积特征分析,沙河街组发育辫状河三角洲平原、辫状河三角洲前缘、前辫状

表 3 沙河街组辫状河三角洲微相储层特征

层位	地区	沉积相		孔隙度/%				渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$			
		相	微相	最大	最小	平均	样品	最大	最小	平均	样品
沙一段	文安	辫状河三角洲	辫状河道	32	21	23~27	78	1763	1	51~459	54
			席状砂	30	10.5	16~27	41	395	1	15~102	395
沙二段	马西 文安		辫状河道	23.8	3.3	12~18	163	2650	1	22~396	163
			辫状河道	27.1	6.1	15~22	41	246	1	25~85	18
沙三段	文安 留西		辫状河道	27.6	10.3	16~19.5	9				
			水下分流河道	19.2	7.1	13~15.5	61	60.1	0.5	5~15	61
沙四段	文安	席状砂	27	4	10~20	480	416	1	2~32	368	
		席状砂	22.5	4.6	15~20	35	45	5	16~30	35	
	河西	水下分流河道	23	4	13~14	170	1877	0.8	5~130	170	

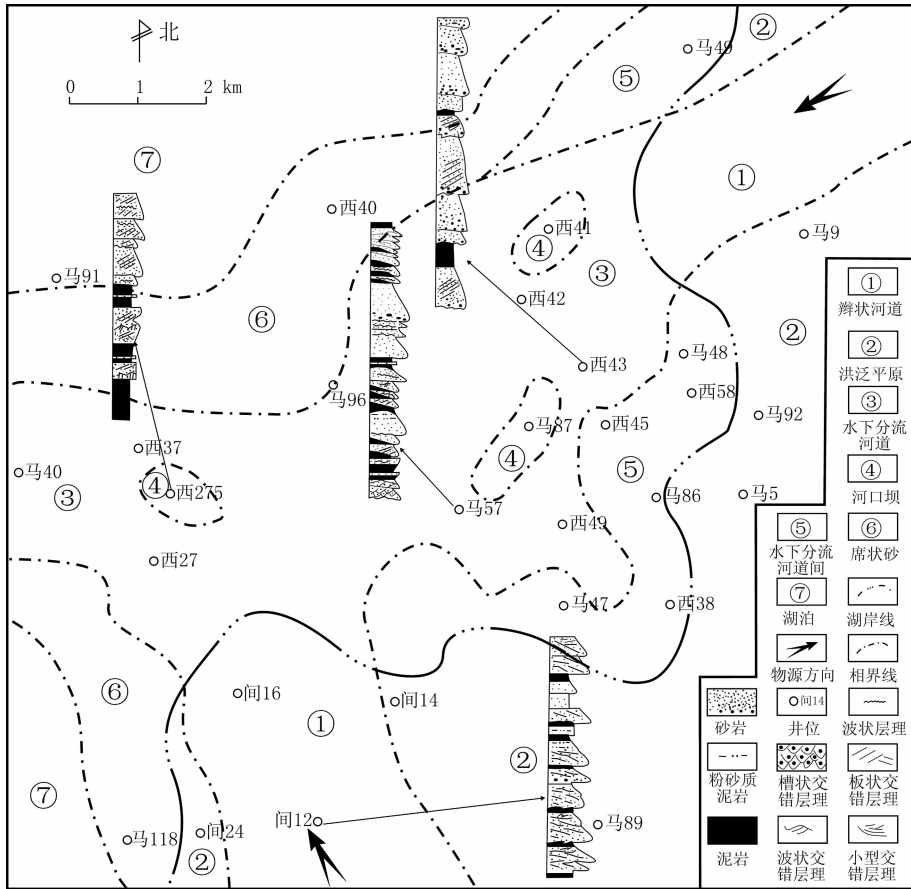


图8 马西地区沙二段辫状河三角洲沉积相图

Fig.8 Sedimentary facies of braided river delta of 2nd Member of Shahejie Formation in Maxi area

河三角洲等3个亚相,辫状河道、洪泛平原、河间洼地、水下分流河道、水下分流河道间、河口坝和席状砂等7个微相。

(3) 饶阳凹陷辫状河三角洲发育模式在平面上表现为由物源至湖泊可发育冲积扇-辫状河-辫状河三角洲沉积类型,单个辫状河三角洲砂体呈扇形,多个则组成裙边状沿湖岸分布。辫状河三角洲平原砂体的砂泥比高,单层厚度大。辫状河三角洲前缘的水下分流河道和河口坝砂体的砂泥比中等,单层厚度及砂体总厚度中等。辫状河三角洲前缘席状砂体颗粒较细,单砂层变薄,向前辫状河三角洲方向泥质增加,砂质减少,逐渐过渡为湖相泥质沉积。地震相特征也显示低频弱振幅斜交充填地震相、杂乱弱振幅块状相→丘状充填相、斜交充填相、丘状相、楔状相→中高频连续、较连续席状相的变化规律等规律性变化。

(4) 饶阳凹陷沙河街组储集空间有原生孔隙和

次生孔隙两种成因类型,不同的微相类型具有不同的储集性,辫状河三角洲平原辫状河道砂体和辫状河三角洲前缘席状砂、河口坝砂体储集物性最好,是下一步勘探的有利储层。

致谢:在专题研究过程中得到华北油田勘探开发研究院的支持和帮助,并提供了相关基础数据,在此深表谢意。

参考文献(References):

[1] 张文朝,崔周旗,韩春元,等.冀中拗陷老第三纪湖盆演化与油气[J]. 古地理学报, 2001, 3(1):45-49.
Zhang Wenchao,Cui Zhouqi,Han Chunyuan,et al. Evolution of Palaeogene lacustrine basins and oil and gas potentials in the central Hebei Depression [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3(1):45-49 (in Chinese with English abstract).

[2] 倪超,纪友亮. 饶阳凹陷古近系沙河街组层序地层分析及沉积体系研究[J]. 中国地质, 2006, 33(1):193-200.
Ni chao, Ji Youliang. Sequence stratigraphy and sedimentary system

- of the paleogene Shahejie Formation in the Raoyang sag [J]. *Geology in China*, 2006, 33(1):193-200(in Chinese with English abstract).
- [3] 杜金虎, 邹伟宏, 费宝生, 等. 冀中坳陷古潜山复式油气聚集区 [M]. 北京: 科学出版社, 2002:181-184.
Du Jinhui, Zou Weihong, Fei Baosheng, et al. The Multiple Hydrocarbon Accumulation Zone Oil Pool in Buried Hills of Jizhong Depression [M]. Beijing: Science Press, 2002:181-184 (in Chinese with English abstract).
- [4] 冯增昭. 沉积岩石学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1993:145-146.
Feng Zengzhao. *Sedimentary Petrology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993:145-146 (in Chinese with English abstract).
- [5] 赵澄林, 刘孟慧, 纪友亮, 等. 东濮凹陷下第三系碎屑岩沉积体系与成岩作用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992:60-63.
Zhao Chenglin, Liu Menghui, Ji Youliang, et al. Clastic Depositional System and Diagenesis of Paleogene in Dongpu Depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992:60-63 (in Chinese with English abstract).
- [6] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学(第三版) [M]. 北京: 石油工业出版社, 2001:311-324.
Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. *Sedimentary Petrology (Third Edition)* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001:311-324 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李文厚. 吐哈盆地台北凹陷温吉桑辫状河三角洲与油气聚集 [J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(3):231-235.
Li Wenhui. Wenjisang braid delta in Taibei sag, Turpan-Hami basin and its hydrocarbon accumulation [J]. *Oil & Gas Geology*, 1997, 18 (3):231-235 (in Chinese with English abstract).
- [8] 纪友亮, 张宏, 张立强. 祁连盆地木里坳陷上三叠统辫状河三角洲沉积模式 [J]. 石油勘探与开发, 1998, 25(5):30-36.
Ji Youliang, Zhang Hong, Zhang Liqiang. The depositional models of braided delta of Upper Triassic in Muli depression of South Qilian Basin, Qinghai Province, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 25 (5):30-36 (in Chinese with English abstract).
- [9] 顾家裕, 方辉, 贾进华. 塔里木盆地库车坳陷白垩系辫状河三角洲砂体成岩作用和储层特征 [J]. 沉积学报, 2001, 19(4):517-523.
Gu Jiayu, Fang Hui, Jia Jinhua. Diagenesis and reservoir characteristics of Cretaceous braided delta sandbody in Kuqa depression, Tarim Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19 (4):517-523 (in Chinese with English abstract).
- [10] 袁静. 济阳坳陷南部古近系洪水—漫湖沉积 [J]. 中国地质, 2005, 32(4):655-662.
Yuan Jing. Paleogene flooded lake sediments in the southern part of the Jiyang depression [J]. *Geology in China*, 2005, 32(4):655-662 (in Chinese with English abstract).
- [11] 郑超, 李宝芳, 温显端. 秦岭北麓晚二叠世平顶山段辫状河—辫状河三角洲沉积体系及其构造涵义 [J]. 现代地质, 2003, 17(4):415-421.
Zheng Chao, Li Baofang, Wen Xianduan. Depositional characteristics of the late Permian braided channel-braided delta deposits in northern foothills of the Qinling mountains [J]. *Geosciences*, 2003, 17 (4):415-421 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张文朝, 王洪生. 二连盆地辫状河三角洲沉积特征及含油性 [J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2000, 15:3-6
Zhang Wenchao, Wang Hongsheng. Depositional Feature and Oil-bearing Feature of the Braided River Delta in Erlian Basin [J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 2000, 15:3-6 (in Chinese with English abstract).
- [13] 曾联波, 李跃纲, 张贵斌, 等. 川西南部上三叠统须二段低渗透砂岩储层裂缝分布的控制因素 [J]. 中国地质, 2007, 34(4):622-627.
Zeng Lianbo, Li Yuegang, Zhang Guibin, et al. Controlling factors for fracture distribution in the low-permeability sandstone reservoir of the Second Member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the south of western Sichuan [J]. *Geology in China*, 2007, 34(4):622-627 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张莉, 钟大康, 朱筱敏. 惠民凹陷古近系碎屑岩储层性质主控因素简析 [J]. 中国地质, 2005, 32(4):682-689.
Zhang Li, Zhong Dakang, Zhu Xiaomin. Main controlling factors of Paleogene sandstone reservoirs in the Huimin subbasin [J]. *Geology in China*, 2005, 32(4):682-689 (in Chinese with English abstract).

Sedimentary characteristics and reservoir properties of the Shahejie Formation braided river delta in Raoyang Sag

ZHANG Da-zhi^{1,2}, JI You-liang³, HAN Chun-yuan⁴, CHU Li-lan⁵, NI Chao²

(1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Petrochina, Beijing 100083, China; 2. Hangzhou Institute of Petroleum Geology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 3. China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. Huabei Oilfield Company, Petrochina, Renqiu 062552, Hebei, China; 5. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield, Daqing 163712, Heilongjiang, China)

Abstract: The Shahejie Formation in Raoyang Sag mainly comprises a set of terrigenous clastics such as conglomerate, conglomeratic sandstone, sandstone, siltstone and mudstone. A study of sedimentary characteristics led to the recognition of typical braided river delta deposition, whose characteristics are distinct and significantly different from other types of deltas resulting from river tractive current sedimentation which are generally controlled by torrential flood and seem to be seasonal sediments. The most notable feature of the braided river delta deposition in this area is the existence of a three-layer structure, which is composed from bottom to top of pre-braided river delta subfacies, braided river delta front subfacies and braided river delta plain subfacies, showing an obvious progradational sequence. There are several main microfacies, such as braided distributary channel, flood plain, subaqueous distributary channel, subaqueous inter-distributary channel, mouth bar and sheet bar. According to lithologic characteristics, sedimentary structure, grain size and sedimentary sequence of the braided river delta, a sedimentary model for the braided river delta was established. From lithologic characteristics of deposition, it is thought that the thickly-bedded conglomerate and conglomeratic sandstone developed in the braided river delta are widely distributed and constitute favorable oil and gas reservoirs. The sand bodies of the subaqueous distributary channel and mouth bar make up the most beneficial reservoirs and can form useful lithologic reservoirs. These places deserve much attention in future exploration.

Key words: Raoyang Sag; Shahejie Formation; braided river delta; sedimentary model; reservoir properties

About the first author: ZHANG Da-zhi, male, born in 1981, doctor candidate, engages in research on sedimentology and stratigraphy; E-mail: zhangdazhi-123@163.com.