

## 辽东湾海域古近系辫状河三角洲砂体沉积特征

张国坤,张汶,郭维,吕世聪,杨宏飞  
(中海石油(中国)有限公司天津分公司,天津塘沽300459)

**摘要:**为研究辽东湾海域古近系辫状河三角洲前缘砂体沉积特征及主控因素,开展了薄片鉴定、岩心观察、测井分析等研究,并结合钻井情况对各类辫状河三角洲沉积模式及其差异性进行了综合分析。结果表明:(1)研究区古近系辫状河三角洲类型主要包括进积型和复合型2种类型;(2)古物源、古地貌和古气候3个因素共同控制了辫状河三角洲的类型及沉积特征,其中古物源供给强度是物质基础,控制了砂体的粒度及规模,古地貌中古沟谷控制了砂体的沉积位置,古气候和古地貌坡度陡缓影响了砂体的展布形态;(3)古物源强,与古沟谷对接好,古地貌平缓的沉积区域砂体厚度大、范围广,为油气勘探的有利目标。该研究成果可为辫状河三角洲储层的油气勘探开发提供借鉴作用。

**关键词:**古地貌;古物源;古气候;辫状河三角洲;古近系;辽东湾海域

中图分类号:TE132 文献标志码:A

## Sedimentary characteristics of sand bodies in the braided river delta of Paleogene in Liaodong Bay

ZHANG Guokun,ZHANG Wen, GUO Wei, LYU Shicong, YANG Hongfei  
(Tianjin Branch of CNOOC Limited, Tianjin 300459, China)

**Abstract:** To study the sedimentary characteristics and main controlling factors of the sand body in front of the Paleogene braided river delta in Liaodong Bay, it was carried out studies on thin-section identification, core observation, logging analysis, etc. And the sedimentary patterns of the braided river deltas and their differences were comprehensively analyzed in combination with the drilling conditions. The results show that: 1) The types of Paleogene braided river deltas in the study area mainly include two types: progradation and composite. 2) The types and sedimentary characteristics of the braided river delta are controlled by three factors: ancient provenance, ancient landform, and ancient climate. The supply intensity of ancient provenance is the material basis, which controls the grain size and scale of the sand body. The ancient gullies in the ancient landform control the sedimentary position of the sand body. The steep slope of the ancient climate and ancient landform affects the distribution form of the sand body. 3) The sedimentary area with a strong ancient material source, good connection with ancient gullies, and gentle ancient landform has a large sand body thickness and wide range, which is a favorable target for oil and gas exploration. The research results can provide a reference for hydrocarbon exploration and development of the braided river delta reservoirs.

**Key words:** ancient landform; antiquarian source; paleoclimate; braided river delta; Paleogene system; Liaodong Bay

引用格式:张国坤,张汶,郭维,等.辽东湾海域古近系辫状河三角洲砂体沉积特征[J].复杂油气藏,2023,16(3):241-247.

ZHANG Guokun, ZHANG Wen, GUO Wei, et al. Sedimentary characteristics of sand bodies in the braided river delta of Paleogene in Liaodong Bay[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(3): 241-247.

三角洲相是指在河流入海(或入湖)的河口区,因坡度减缓,水流扩散,流速降低,导致携带的泥沙沉积,为储层发育的重要沉积相类型<sup>[1]</sup>。辫状河三角洲作为其中重要类型之一,也越来越受到重视,国内学者对辫状河三角洲沉积模式、成因机制及沉积特征等方面进行了深入研究<sup>[2-3]</sup>。周丽清等<sup>[4]</sup>通过温米油田中侏罗统三间房组辫状河三角洲研究,

建立了受可容空间变化的辫状河三角洲前缘砂体沉积模式。刘自亮等<sup>[5]</sup>通过对鄂尔多斯盆地西峰地

收稿日期:2023-02-04;改回日期:2023-05-11。

第一作者简介:张国坤(1988—),硕士,工程师,主要从事石油地质方面的研究工作。E-mail: zhanggk@cnoc.com.cn。

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“渤海油田高效开发示范工程”(2016ZX05058)。

区晚三叠世延长组辫状河三角洲沉积体系深入研究,建立了该地区辫状河三角洲沉积微相组合模式,并对其形成机制做了详细分析。于兴河等<sup>[6]</sup>在对三角洲沉积体系的发展历程、成因机制及沉积特征等方面进行探讨研究的基础上,提出了三角洲成因分类方法以及采用岩、电、震结合的编图方法。葛家旺等<sup>[7]</sup>通过对珠江口盆地陆丰凹陷恩平组辫状河三角洲进行深入研究,总结了该地区辫状河三角洲的类型、沉积特征和演化规律。李威等<sup>[8]</sup>通过对珠江口盆地陆丰凹陷A油田辫状河三角洲沉积体系的研究,建立了古近系高分辨率层序地层格架,并指明其砂体沉积期次和演化规律。

近几年,中国海油在辽东湾海域斜坡带勘探取得了较好成效,发现了绥中36,旅大29、旅大16等多个辫状河三角洲油田,但各个油田储层发育程度和储层发育的位置、岩性、规模大小、物性均表现出较大的差异,而且同一油田不同期次的辫状河三角洲砂体非均质性差异也较大,优质储层发育展布规律和主控因素尚未完全研究清楚。因此,有必要对辽东湾海域辫状河三角洲砂体的沉积特征、沉积模式、控制因素进行对比研究,以期对相似地质条件的辫状河三角洲储层的油气勘探提供借鉴。

## 1 区域背景

辽东湾海域位于渤海湾盆地东北部,整体上为北东走向的狭长构造带,南邻渤中坳陷,东西两侧分别与胶辽隆起和燕山褶皱带相接。构造上整体可划分为三凹夹两凸的格局,自东向西分别是辽东凹陷、辽东凸起、辽中凹陷、辽西凸起和辽西凹陷,各构造单元均呈北东—南西向相互平行展布(图1)。经过多年勘探,在各凸起上发现多个油气田证实了该区域的成藏潜力。随着凸起区域勘探程度逐渐提高,近几年在凸起向凹陷过渡的斜坡区发现一批像旅大6油田、旅大16油田、旅大29油田和绥中36油田等多个大规模辫状河三角洲油藏,已成为当前和未来一段时期内的重要增储目标,其砂体主要发育在古近系东营组和沙河街组,具有砂泥岩不等厚互层或巨厚砂岩沉积特征,整体上为高孔中高渗储层。

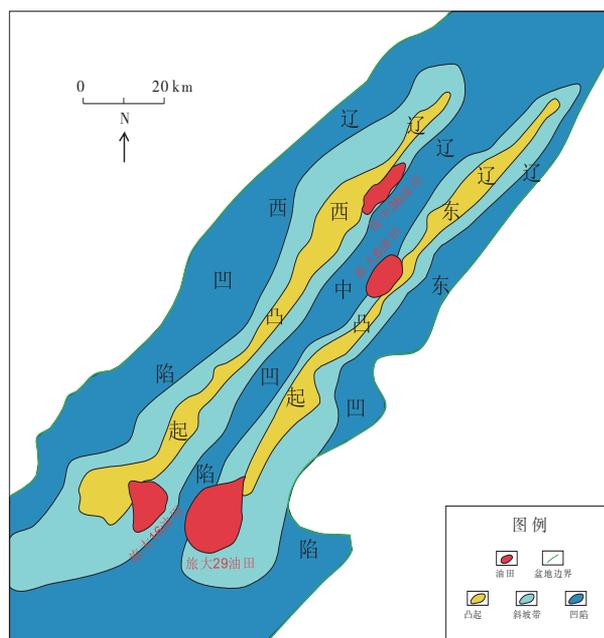


图1 渤海湾盆地辽东湾海域构造单元划分

## 2 辫状河三角洲沉积特征

### 2.1 岩石学特征

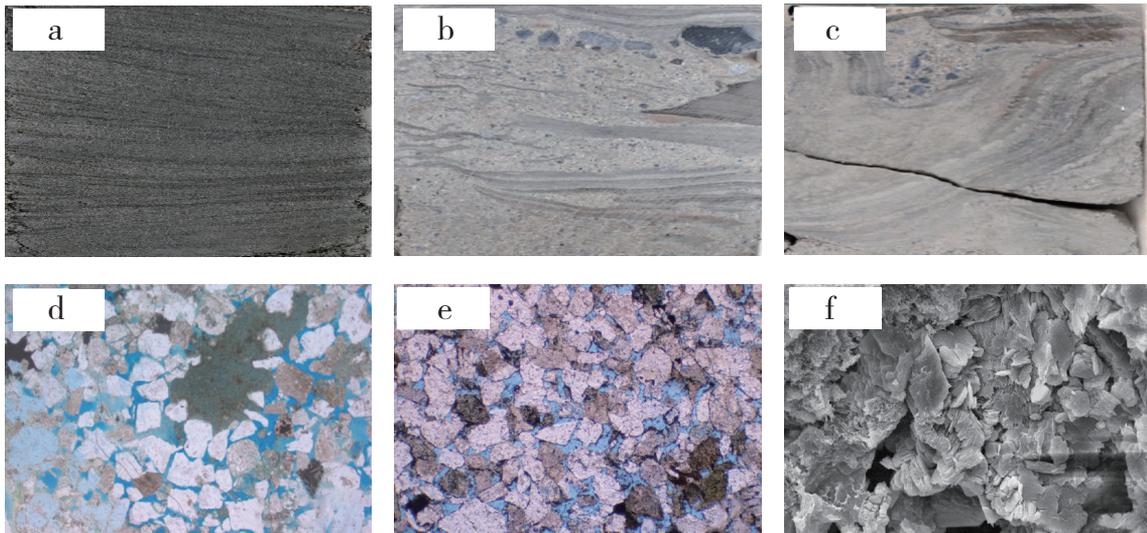
根据岩心及壁心观察,结合薄片鉴定等研究成果综合分析,辽东湾区域古近系辫状河三角洲储层岩性主要以中、细粒岩屑长石砂岩为主,矿物成分主要为石英、长石、岩屑,石英含量24.0%~34.0%,平均27.8%;长石含量30.0%~45.0%,平均40.2%;岩屑22.0%~41.0%,平均32.0%。岩心观察可见交错层理、揉皱变形构造和砾石的定向排列等流动成因构造特征,碎屑颗粒分布不均,分选中等—好,颗粒呈次棱状,颗粒间点接触为主,填隙物主要为泥质和碳酸盐矿物。铸体薄片和扫描电镜显示,孔隙类型以原生粒间孔为主,少量溶蚀粒间孔,孔隙发育,连通性好,粒间充填物为丝絮状伊利石和鳞片状高岭石(图2)。通过岩心、壁心常规地面孔隙度、渗透率分析,储层孔隙度分布范围19.5%~33.9%,中值25.6%,平均值25.9%,渗透率分布范围(1.4~528.6) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,中值7.0 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均值为56.8 $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。毛管压力曲线以细—中歪度为主,排驱压力0.034~0.138 MPa,饱和度中值压力0.543~15.345 MPa,平均孔喉半径0.598~7.541  $\mu\text{m}$ 。

### 2.2 沉积相、岩相、测井相和地震相特征

辫状河三角洲是指辫状河推进到海、湖中形成的一种粗碎屑三角洲,由于辫状河具有坡度缓、水体浅、河道频繁摆动等特征,因此辫状河入湖后受河道摆动切割影响,河口坝砂体发育规模相对较

小,以水下分流河道砂体沉积为主<sup>[9-10]</sup>。根据岩心、壁心资料统计分析,辽东湾区域古近系辫状河三角洲储层岩性以细砂岩、中粗砂岩为主,局部含有砾石。岩心观察可见小型槽状交错层理、揉皱变形构造和砾石的定向排列,测井曲线表现为自然伽马(*GR*)曲线齿状箱型、漏斗型或指型低值间互。沉积微相可进一步划分为水下分流河道、河口坝和水下分流河道间。其中水下分流河道微相岩性以中细砂岩、含砾中—粗砂岩为主,分选中等—好,磨圆度

次棱—次圆状,表现为向上逐渐变细的正粒序,底部发育冲刷面,沉积构造主要有块状层理、槽状交错层理,自然伽马曲线形态呈齿状箱形。河口坝微相岩性为含砾细砂岩,在垂向上一般呈下细上粗的反韵律,沉积构造主要有交错层理、平行层理和斜层理,自然伽马曲线形态多呈漏斗形和齿化漏斗形。水下分流河道间微相岩性以泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩为主,发育低幅度小型波纹交错层理,见生物扰动变形构造,自然伽马曲线呈低平或小齿状。



a. 岩心照片, 绥中36油田1井, 沙河街组, 2 022.98 m~2 023.06 m; b. 岩心照片, 旅大16油田1井, 东营组, 2 899.35 m~2 899.43 m; c. 岩心照片, 旅大16油田1井, 东营组, 2 902.32 m~2 902.40 m; d. 铸体薄片照片, 旅大16油田1井, 东营组, 2 556.00 m; e. 铸体薄片照片, 绥中36油田2井, 沙河街组, 2 329.00m; f. 扫描电镜照片, 绥中36油田2井, 沙河街组, 2 263.00 m;

图2 渤海湾盆地辽东湾海域古近系各类辫状河三角洲储层岩石学特征

对于陆源碎屑沉积砂体而言,物源的远近强弱控制着砂体规模大小和岩相组合模式,因此区域构造演化是辫状河三角洲砂体规模大小的重要控制因素<sup>[11]</sup>。

根据区域沉积演化研究,辽东湾区域中辽西凸起和辽东凸起中生界地层遭受长期风化已剥蚀殆尽,古生界碳酸盐岩和太古界花岗岩潜山广泛出露。古近系早期,孔店组和沙河街组2段—4段沉积时期区域裂隙活动强烈,靠近边界断裂地层强烈剥蚀,在辽西凸起东侧斜坡带和辽东凸起西侧斜坡带形成相对低洼区。古近系晚期,东营组和沙河街组1段沉积时期区域海平面整体上升,早期剥蚀形成的低洼区处于湖平面以下,形成有效可容纳空间,开始接受来自凸起的沉积物,并超覆于古潜山之上,因此受不同物源作用影响,在辽东湾区域内不

同构造带发育多种类型的辫状河三角洲沉积。

其中绥中36油田和旅大16油田发育在辽西凸起向辽中凹陷过渡的斜坡带上,绥中36油田在沙一段和沙二段时期沉积了三套厚砂体,各期次砂体叠置连片发育,岩相上为砂泥岩不等厚互层沉积,伽马曲线具有齿化漏斗状特征,地震轴具有斜交复合形前积反射特征。旅大16油田在东营组时期只沉积了一套砂体,岩相上为砂泥岩不等厚互层沉积,伽马曲线具有齿化箱状特征,地震轴具有乱岗状前积反射特征,砂岩百分含量44.7%~78.9%,平均57.7%,储层厚度77.0~113.1 m。而旅大29油田发育在辽东凸起向辽中凹陷过渡的斜坡带上,在沙二段时期沉积了四套砂体,岩相上为砂泥岩不等厚互层沉积,伽马曲线具有齿状特征,地震轴具有楔状斜交前积反射特征(图3)。

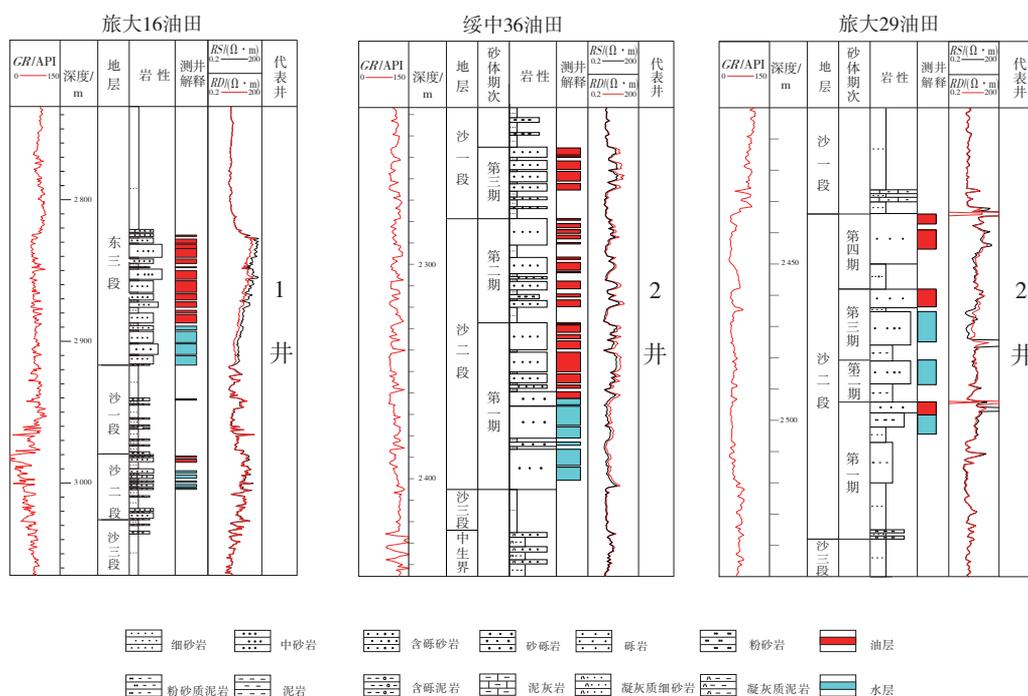


图3 渤海湾盆地辽东湾海域各油田辫状河三角洲砂体岩-电柱

### 3 辫状河三角洲发育主控因素

目前许多学者对辫状河三角洲的受控因素进行了分析研究,总体上认为其发育主要受古物源、古地貌和古气候3大因素控制<sup>[12-13]</sup>,其中古物源供给强弱是控制辫状河三角洲规模大小的决定性因素,沉积坡折带古地貌形态控制了砂体沉积位置及砂体边界范围,而古气候影响了湖平面的升降控制并形成了辫状河三角洲砂体时间上先后发育、空间上互补错位的关系<sup>[14]</sup>。

根据区域构造运动研究认识,辽东湾海域古近系沉积中心主要为辽中凹陷,且具有由南向北迁移特征。沙河街组四段到孔店组沉积时期,湖泊分布局限,仅在辽中凹陷和辽西凹陷接受沉积,其沉积中心为辽中凹陷的中部,最厚沉积厚度可达2 000 m。沙河街组三段沉积时期,随着湖平面上升沉积范围扩大,其沉积仍集中在辽中凹陷与辽西凹陷,其中辽中凹陷的沉积中心有两处,一个位于中部,一个位于西南部,接受来自辽东凸起和辽西凸起的沉积物,地层厚度在2 200~2 400 m。沙河街组一、二段沉积时期,湖泊分布广泛,沉积中心主要有三个,分别位于辽中凹陷北部(绥中36油田)、中部和西南部(旅大29油田),但沉积厚度总体不大,全区平均厚度为200~300 m。东营组三段沉积时期,沉

积中心位于辽中凹陷的南部(旅大16油田),地层最厚处可达2 000 m。东营组二段沉积时期,湖平面进一步上升,沉积范围进一步扩大,辽西凸起大部分区域已处于水下接受沉积,沉积中心位于辽中凹陷北部,沉积厚度最大可达1 400 m。东营组一段沉积时期,出露湖面的隆起区范围更小,多集中在辽东凸起的中北部,沉积中心北移,且位于辽中凹陷的北部,沉积厚度在500 m左右。总体上来看沉积砂体受盆地形态控制,沿边界断层和盆内两凸起的主要控制断层呈北东—南西向展布。

通过对辽东湾海域古近系辫状河三角洲实钻情况统计,辽西凸起中段斜坡带绥中36油田钻探4口井,沙一段和沙二段共发育3期砂体,纵向上各期砂体发育程度不一,但横向分布较稳定具有一定的对比性。通过区域研究,结合古物源、古地貌和古气候分析,第1期砂体沉积时期,湖平面相对较浅,可容空间较小,物源供给能力强,该时期砂体沉积厚度大,展布范围广;而第2期砂体沉积时期,随着湖平面上升,可容空间变大,同时物源供给能力降低,导致储层发育程度减弱,砂体主要在沉积中心的2井区和3井区附近发育;第3期砂体沉积时期,随着湖平面上升,可容空间进一步变大,虽然物源供给能力较强,但储层厚度继续减薄,同时该时期古地貌相对平缓,砂体展布范围相对较广。

综上所述,该区域受古物源强弱的影响,形成了3期砂体厚度及发育程度上的差异,从统计数据可见第1期砂体净毛比最高,反映该时期古物源最强(图3、表1);同时结合古地貌特征以及湖平面变化导致可容空间的影响,各期砂体表现出平面上沉积位置和展布范围的差异,从沉积相图和顺物源、垂直物源地震剖面可见,古地貌沟谷位置控制了砂

体沉积中心位置,并且对于同一期砂体而言,古地貌特征是影响砂体厚度的关键因素(图4)。平面上,与沟谷体系对接的2井区为该时期油田的沉积中心,砂体最发育,多期砂体叠置沉积,储层厚度大,而位于中心两侧的扇缘区域北部的4井区和南部的1井区,沉积期次相对较少,储层厚度相对较薄(图5)。

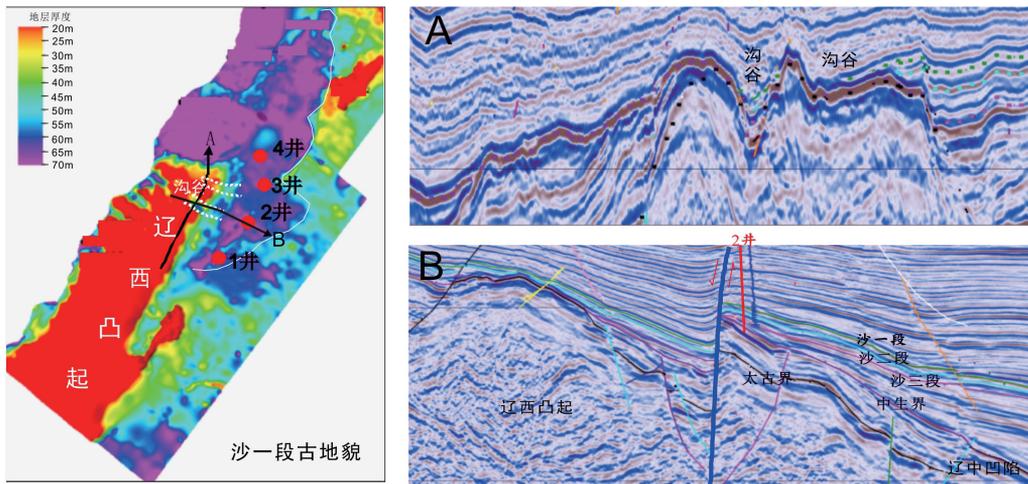


图4 绥中36油田沙河街组沙一段古地貌和地震剖面

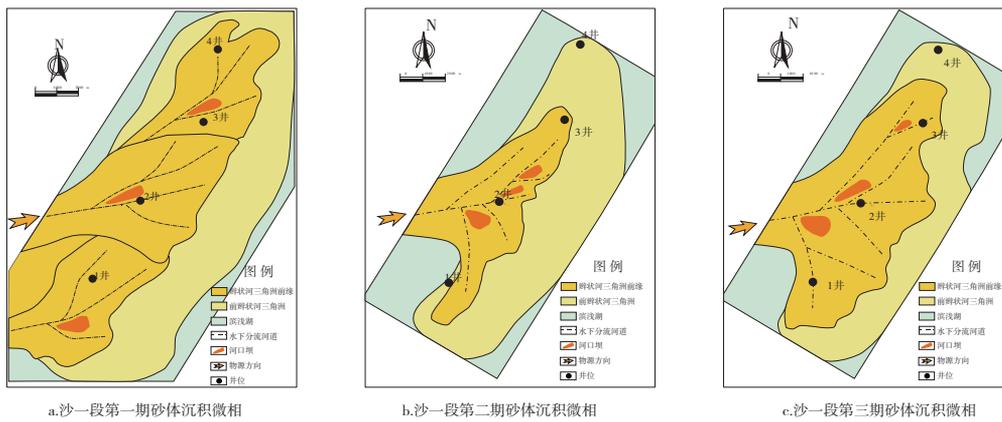


图5 绥中36油田沙河街组沙一段沉积微相

辽西凸起南段斜坡带旅大16油田钻探3口井,东三段主要发育1期砂体,根据古物源和古地貌研究结果,结合井上实钻情况分析,砂体富集区主要受古物源与古地貌沟谷地形耦合控制,耦合好的位置对应砂体富集区,1井位于古物源与古沟谷耦合的辫状河三角洲扇体发育区,其砂体厚度最大,而与之相距较远的3井则未钻遇该期砂体,其砂体的发育模式类似于绥中36油田第2期砂体(图6)。

辽东凸起南段斜坡带旅大29油田根据区域已钻3口井和沉积体系研究发现,该油田砂体发育同样受控于古物源、古地貌和古气候三个主要因素,

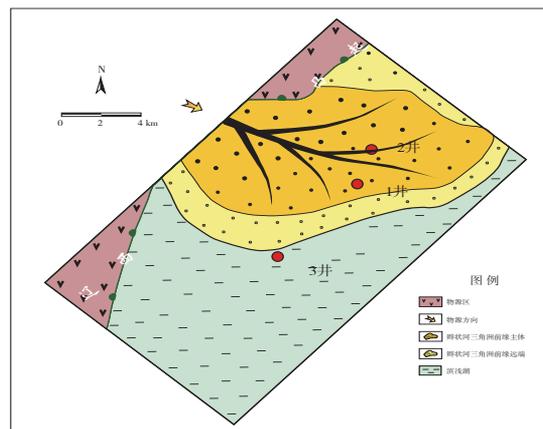


图6 旅大16油田东营组东三段沉积相

其中古沟谷与边界断层控制了沉积物的初始卸载位置,古气候控制湖平面的升降影响了砂体的沉积范围,古物源的强弱则控制了砂体的厚度及规模。油田沙二段发育四套砂体,平面上来看,位于古物源与古沟谷的主沉积带上的2井和3井,4期砂体沉积厚度均较大,岩性也相对较粗,为砂砾岩或含砾粗砂岩,物性也较好,而位于扇体边缘的1井仅钻遇3期砂体,其厚度整体相对变薄,岩性为砂砾岩、含

泥砾岩和灰质粉砂岩,物性变差。纵向上来看,除第2期砂体物源相对较弱局限发育于2井和3井外,其余3期砂体物源强度相当,各期砂体厚度及净毛比较为相近(表1),但整个沙二段时期湖平面整体下降,同时受古地貌形态填平补齐作用影响,导致后两期砂体沉积时期古地貌相对前两期平缓,且可容空间较小,因此前两期砂体展布范围明显小于后两期砂体展布范围(图7)。

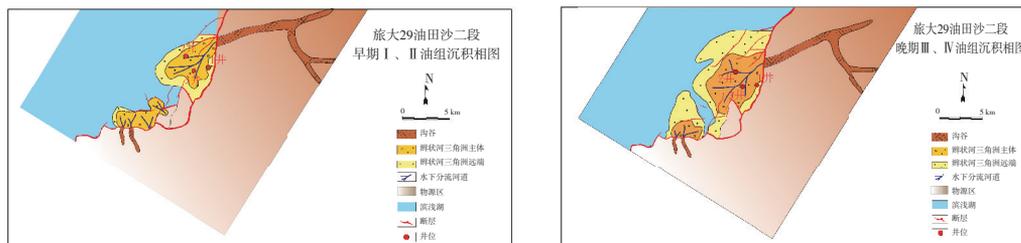


图7 旅大29油田沙河街组沙二段沉积相

综合以上分析,古地貌形态控制了辫状河三角洲储层的沉积中心位置,古物源强弱控制了辫状河三角洲砂体粒度粗细、展布范围及储层厚度大小。古气候主要是通过引起湖平面升降,导致可容空间

变化,从而影响辫状河三角洲砂体展布的范围。古物源、古地貌和古气候三大因素相辅相成,共同作用形成了辽东湾海域古近系辫状河三角洲多样的沉积特征<sup>[15]</sup>。

表1 渤海湾盆地辽东湾海域各油田辫状河三角洲砂体发育特征统计

油田	砂体期次	地层厚度/m	砂体厚度/m	净毛比/%	地层倾角/°	砂体面积/km <sup>2</sup>
绥中36油田	第1期	72	66	91.7	5	21.3
	第2期	40	29	72.5	7	9.2
	第3期	58	48	81.0	7	15.8
旅大16油田	第1期	95	82	86.3	7	7.3
旅大29油田	第1期	18	17	94.4	5	6.6
	第2期	14	10	71.4	6	5.2
	第3期	22	20	90.9	8	8.8
	第4期	16	14	87.5	8	9.3

#### 4 辫状河三角洲沉积模式

俗话说“山有多高、水有多深”,这是对辫状河三角洲沉积环境的形象比喻,体现的是古物源与可容空间的变化和古地貌形态的结合<sup>[16]</sup>,形成了辽东湾海域古近系辫状河三角洲进积型和复合型两种典型沉积模式(图8)。

进积型沉积模式纵向上从下往上粒度逐渐变粗,沉积相及岩性由前三角洲泥岩过渡到三角洲前缘远端席状砂粉—细砂岩、三角洲前缘水下分流河道沉积的含砾砂岩和砂砾岩;并且后一期砂体披覆

在前一期砂体之上,并超出前一期砂体沉积范围,表现出“前进”形态;旅大29油田为该类沉积模式,此模式成因是沉积过程中快速湖退和沉积古地貌坡度变缓所致。

复合型沉积模式纵向上从下往上粒度表现为先变细之后又变粗的复合韵律,沉积相及岩性由三角洲前缘水下分流河道含砾砂岩和粗砂岩过渡到三角洲前缘远端席状砂粉—细砂岩、三角洲前缘水下分流河道沉积的中—粗砂岩;绥中36油田为该类沉积模式,此模式成因是在沉积过程中湖退后湖进和沉积古地貌坡度变缓共同作用造成的。

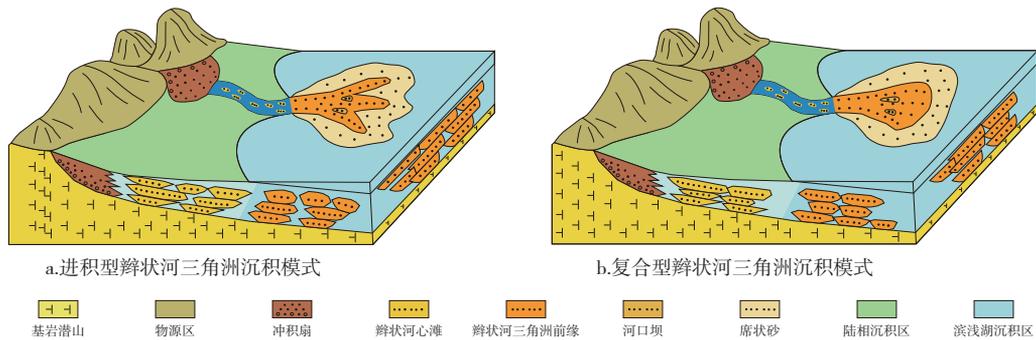


图8 辽东湾海域辫状河三角洲沉积模式

## 5 结论

辽东湾海域古近系辫状河三角洲前缘砂体发育主要受“古物源、古地貌、古气候”三方面因素耦合控制,根据三因素之间关系结合砂体发育形态可划分为进积型和复合型两种辫状河三角洲沉积模式。其中古物源供给强弱控制了辫状河三角洲规模大小及岩性粗细,沉积古地貌中古沟谷位置控制了砂体沉积位置,而古气候影响了湖平面的升降导致可容空间的变化,同时受古地貌坡度陡缓共同控制并形成了辫状河三角洲砂体展布范围。针对不同受控因素、地质模式下的测井相、岩相、地震相等资料进行了统计分析,位于古物源与古沟谷的主沉积带上、且古地貌平缓的沉积区多期砂体叠置发育,厚度大、范围广。

### 参考文献:

- [1] 朱筱敏,张义娜,杨俊生,等.准噶尔盆地侏罗系辫状河三角洲沉积特征[J].石油与天然气地质,2008,29(2):244-251.
- [2] 周淋,吕传炳,纪友亮,等.远源浅水辫状河三角洲前缘储层构型模式研究:以冀中坳陷饶阳凹陷留西油田L18断块为例[J].古地理学报,2019,21(6):959-970.
- [3] 靳军,刘大卫,纪友亮,等.砾质辫状河型冲积扇岩相类型、成因及分布规律——以准噶尔盆地西北缘现代白杨河冲积扇为例[J].沉积学报,2019,37(2):254-267.
- [4] 周丽清,熊琦华,吴胜和,等.辫状河三角洲前缘沉积模式及砂体预测——以吐哈盆地温米油田中侏罗统为例[J].新疆石油地质,1999,20(5):402-404,449.
- [5] 刘自亮,王多云,王峰,等.陕甘宁盆地西峰油田主要产层储油砂体沉积微相组合及特征[J].沉积学报,2005,23(2):248-254.
- [6] 于兴河,李胜利,李顺利.三角洲沉积的结构—成因分

类与编图方法[J].沉积学报,2013,31(5):782-797.

- [7] 葛家旺,朱筱敏,吴陈冰洁,等.辫状河三角洲沉积特征及成因差异——以珠江口盆地陆丰凹陷恩平组为例[J].石油学报,2019,40(S1):139-152.
- [8] 李威,居宇龙,朱义东,等.辫状河三角洲砂体叠置演化规律及其在调整井实施中的应用——以珠江口盆地陆丰凹陷A油田恩平组为例[J].中国海上油气,2021,33(4):94-102.
- [9] 赵国祥,官大勇,刘朋波,等.庙西南凸起馆陶组浅水辫状河三角洲沉积特征及砂体演化[J].沉积学报,2018,36(4):807-817.
- [10] 陈东阳,王峰,陈洪德,等.鄂尔多斯盆地东部府谷天生桥剖面上古生界下石盒子组8段辫状河储层构型表征[J].石油与天然气地质,2019,40(2):335-345.
- [11] 冯文杰,芦凤明,吴胜和,等.断陷湖盆长轴缓坡辫状河三角洲前缘储层构型研究——以大港枣园油田枣南断块孔一段枣V油组为例[J].中国矿业大学学报,2018,47(2):367-379.
- [12] 程逸凡,董艳蕾,朱筱敏,等.准噶尔盆地春光探区白垩纪古地貌恢复及其控砂机制[J].古地理学报,2020,22(6):1127-1142.
- [13] 王彤,朱筱敏,董艳蕾,等.基于微量元素分析的古沉积背景重建——以准噶尔盆地西北缘古近系安集海河组为例[J].地质学报,2020,94(12):3830-3851.
- [14] 刘成林,刘伟新,顾振宇,等.珠江口盆地陆丰A油田恩平组浅水辫状河三角洲砂体构型研究[J].海相油气地质,2022,27(3):236-248.
- [15] 朱卫红,吴胜和,尹志军,等.辫状河三角洲露头构型——以塔里木盆地库车坳陷三叠系黄山街组为例[J].石油勘探与开发,2016,43(3):482-489.
- [16] 朱筱敏,董艳蕾,曾洪流,等.中国地震沉积学研究现状和发展思考[J].古地理学报,2020,22(3):397-411.

(编辑 刘义梅)