

# 大型坳陷湖盆浅水三角洲形成条件和沉积模式： 以松辽盆地三肇凹陷扶余油层为例

朱筱敏<sup>1,2</sup>, 刘媛<sup>3</sup>, 方庆<sup>4</sup>, 李洋<sup>1,2</sup>, 刘云燕<sup>4</sup>, 王瑞<sup>1,2</sup>, 宋静<sup>4</sup>,  
刘诗奇<sup>2</sup>, 曹海涛<sup>4</sup>, 刘相男<sup>2</sup>

1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249

3. 中国石油东方地球物理公司研究院, 河北 涿州 072750

4. 中国石油大庆油田采油八厂, 黑龙江 大庆 163514

Zhu Xiaomin<sup>1,2</sup>, Liu Yuan<sup>3</sup>, Fang Qing<sup>4</sup>, Li Yang<sup>1,2</sup>, Liu Yunyan<sup>4</sup>, Wang Rui<sup>1,2</sup>,  
Song Jing<sup>4</sup>, Liu Shiqi<sup>2</sup>, Cao Haitao<sup>4</sup>, Liu Xiangnan<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China

3. Research Institute of BEG, CNPC, Zhuozhou 072750, China

4. Daqing Oilfield Company, CNPC, Daqing 163514, China

**Zhu Xiaomin, Liu Yuan, Fang Qing, et al. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake, example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao Sag, Songliao Basin. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 089-099**

**Abstract:** The research of some core, logging, seismic data from Quantou Formation in Sanzhao Sag has been finished and some Geological ideas have been got, that is, the provenance of Sanzhao Sag was located in the north and southwest of Songliao Basin during the period of Quantou Formation, and the geological conditions were favorable for the formation of the large-scale shallow delta: the basement sank stably and the palaeotopography was gentle and smooth slope; the physical weathering was strong due to the arid palaeoclimate(up to 37 °C); the lake level changed cyclically because of two cycles of palaeoclimate change from arid to humid; the lake water was shallow less than 10 meters and lake level changed obviously. The shallow delta of Sanzhao Sag has obvious characteristics, that is the finer grain size, plenty of sedimentary structures formed by strong hydropower, wide purple mudstone with lots of bioturbation structure, several non-continuous normal cycles vertically, imbricated progradation seismic facies, large scale sandbody distribution with low percentage of sandstone to mudstone, and very unique distributary channels with few mouth bars. The sedimentation of the shallow delta was controlled by the climate change. When it was dry, the lake shrank, resulting in branched delta and branched distributary channels which were broad and shallow; the length of channels was more than 20 km, the width from 800 to 1 800 m, the average thickness of individual layer was 2.3 meters, and the average percentage of sandstone in strata was 35%. When it was wet, the lake expanded, the river branched off diverted frequently due to the lake water obstruction, formed reticular distributary channels that were narrow and deep, the length of the channel was less than 15 km, the width from 500 to 1 600 m, the average thickness of individual layer was 2.8 m, and the average percentage of sandstone in strata was 40%. Therefore, the

收稿日期: 2011-09-30; 修回日期: 2011-11-11

基金项目: 国家科技重大专项项目“大型油气田及煤层气开发”专题(2011ZX05009-002)和“海洋深水油气勘探关键技术”专题(2011ZX05025-005); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2011CB201104); 油气资源与探测国家重点实验室项目

作者简介: 朱筱敏(1960—), 男, 教授, 主要从事沉积学和层序地层学教学科研工作。E-mail: xmzhu@cup.edu.cn

sandbodies of distributary channels are widely distributed, overlapped vertically, and continued laterally, and form favorable lithologic reservoirs.

**Key words:** the Sanzhao Sag; the Cretaceous Quantou Formation; large-scale shallow delta; formation; sedimentary model

**摘 要:**大量地质和地球物理资料分析表明,下白垩统泉头组沉积时期,松辽盆地三肇凹陷的物源主要来自凹陷北部和西南方向,具备了发育大型浅水三角洲的有利地质条件,即盆地基底稳定沉降,盆广坡缓;古气候干热,古温度可达 37℃;母源区物理风化作用强烈,形成大量碎屑物质;古水体浅,小于 10 m,湖平面波动频繁,湖泊水位发生旋回变化等。大型拗陷湖盆浅水三角洲具有以下典型沉积特征:岩性细,成熟度中等,粒度概率曲线具有牵引流沉积特征;砂岩中发育有丰富的强水动力沉积构造;紫红色泥岩大面积展布,生物扰动强烈;垂向上多个间断正韵律相互叠置;具有叠瓦状前积反射地震相;三角洲大面积稳定展布,砂地比值低;发育分流河道、水下分流河道以及席状砂,不发育河口坝。气候是浅水三角洲展布形态的主要控制因素。在干旱气候条件下,湖泊收缩,河流携带碎屑物质长距离搬运,形成枝状三角洲,分流河道在凹陷内的延伸距离一般超过 20 km,宽度为 800~1 800 m。在湿润气候条件下,湖泊扩张,受湖泊的阻碍作用,河道频繁分叉改道,形成网状三角洲,分流河道在凹陷内的延伸距离一般不超过 15 km,宽度为 500~1 600 m。浅水三角洲分流河道砂体分布广,纵横叠置,利于构成岩性油气藏。

**关键词:**三肇凹陷;白垩系泉头组;浅水三角洲;形成条件;沉积模式

**中图分类号:**TE121.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2012)01-0089-11

0 引言

三角洲的研究历史可以追溯到 2 500 年前, Fisk<sup>[1]</sup>在研究密西西比河三角洲时提出了浅水环境形成三角洲的认识,后来他又将河控三角洲分为深水型及浅水型三角洲。Donaldson<sup>[2]</sup>在研究美国石炭纪陆表海时发现水深是一个重要控制因素,进一步说明了浅水三角洲概念。Postma<sup>[3]</sup>将低能盆地中的三角洲分为浅水三角洲及深水三角洲两大类,识别出 8 种浅水三角洲端员。近期国外浅水三角洲的研究逐步深入,涉及浅水三角洲的形成动力学、微相构成及内部结构等多个方面,指出浅水三角洲通常形成于水体较浅、构造相对稳定的陆表海或地形平缓、整体缓慢沉降的大型拗陷盆地环境<sup>[4-8]</sup>。

我国学者对浅水三角洲研究始于 20 世纪 80 年代。目前,浅水三角洲的研究主要集中在松辽、渤海湾、鄂尔多斯、塔里木和准噶尔等主要含油气盆地<sup>[9-19]</sup>,认为浅水三角洲与传统的吉尔伯特型三角洲有明显不同,湖盆浅水三角洲突出特征是以分流河道砂体为骨架,不发育河口坝沉积;形如叶片,薄而广布;复合三角洲面积辽阔,厚度巨大,具叠叶状加积特征;河流作用、气候和湖平面升降变化影响三角洲前缘砂体的改造和席状化;浅水三角洲是在水体较浅和构造稳定的台地、陆表海或地形平缓、整体缓慢沉降的拗陷盆地条件下形成的;依据三角洲前缘的砂体特

征可分为席状、坨状、枝状三种类型;大型湖盆浅水三角洲形成时,湖盆具有敞流特征等。

松辽盆地白垩纪湖盆面积大、水体浅、地形缓、湖平面波动频繁、波浪作用带宽且能量弱,形成了富有特色的大型河流-三角洲沉积体系。该三角洲在规模、垂向层序、骨架砂体类型、平面展布等诸多方面与经典三角洲相比均存在较大差异。1989 年在松辽盆地三肇凹陷升平油田钻遇白垩系泉头组上部泉四段(对应扶余油层),发现了数亿吨油气储量并投入开发。至今,已钻探井、开发井 800 余口,完成全区地震勘探。前人曾研究三肇凹陷局部地区的泉四段沉积微相,但缺少对全区沉积体系类型和成因研究。为了更好地研究浅水三角洲沉积体系及其与油气勘探开发之间关系,本文依据全区地质、地球物理资料和分析化验资料(含 18 口岩心井,心长 1 238 m),结合区域地质背景,分析了三肇凹陷泉四段沉积时期的古地形、古气候及古水深,探索浅水三角洲形成的有利地质背景;进而在高精度层序地层格架中,对浅水三角洲沉积体系和沉积微相特征进行研究,建立大型陆相盆地浅水三角洲沉积模式。

1 区域地质背景

松辽盆地是中国东部以中生代沉积为主的大型陆相拗陷型沉积盆地,总面积约 26×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。三肇凹陷为松辽盆地中央拗陷区内的二级负向构造单

元,是在古中央隆起解体后,由大庆长垣和朝阳沟阶地抬升形成的<sup>[20]</sup>,面积为5 743 km<sup>2</sup>(图1)。区内包括卫星油田、宋芳屯油田、升平油田、徐家围子油田、肇州油田及永乐油田等。

现出西高东低的古地理景观,两物源体系在榆树林地区交汇后向东流出,具有敞流盆地特征。

## 2 浅水三角洲发育背景

松辽盆地下白垩统泉头组扶余油层发育独具特色的大型浅水三角洲沉积,这是因为该三角洲沉积时期具有十分有利于浅水三角洲形成的下列沉积地质背景,即盆广坡缓的古地形,干旱炎热的古气候,频繁多变的湖平面,动荡极浅的古水深,大河充足的古物源。

### 2.1 盆地整体稳定沉降,盆广坡缓,古地形坡度小于1°

采用平衡剖面法恢复了松辽盆地地质历史上各个时期地质体空间形态、位置和相互关系,编制了松辽盆地北部近东西向区域性剖面的演化剖面。这些系列研究表明,自泉头组沉积期开始至嫩江组沉积晚期,三肇凹陷表现为在拉张作用下基底稳定均匀沉降的特点,形成大型负向构造单元。该时期地势平坦,地层产状近于水平,古地形坡度小于1°,为大型浅水三角洲的发育提供了稳定沉降的盆地构造基础。

### 2.2 古气候干热,母岩物理风化作用强烈,物源供给充分

松辽盆地白垩系泉头组三、四段除发育大量陆生植物及其孢粉化石外,水生植物化石不断增加,主要为轮藻、瓣鳃类、介形类。孢粉组合以双束松粉属(*Pinuspollenite*)和内环粉属(*Classopollis*)含量最高;被子花粉含量一般为5%~7%,主要为壳斗粉属(*Cupuliferoidae pollenites*)、网面三沟粉属(*Retitricolpites*)、阔三沟粉属(*Tricolpites*);孢粉组合有气囊松粉(*Pinuspollenites*)和克拉索粉(*Classopollis*)并且含量高。这些化石组合表明,泉头组沉积时期,古气候整体上以干热为主或由干热向湿热转变(图2),这与泉头组内含有石膏层及钙质层相对应。 $\delta^{18}\text{O}$ 古地温并结合微体古生物资料分析,推断松辽盆地泉头组沉积时期,气候炎热干旱,古温度可达37℃。

干热的古气候加剧了母源区的物理风化作用,产生了丰富的紫红色碎屑物质,在大型河流作用下,发生长距离搬运,为大型浅水三角洲的形成提供了良好的气候和物源条件。

### 2.3 古水体浅且动荡,湖水涨缩,水深旋回变化

三肇凹陷泉四段包含的介形类主要是壳饰简

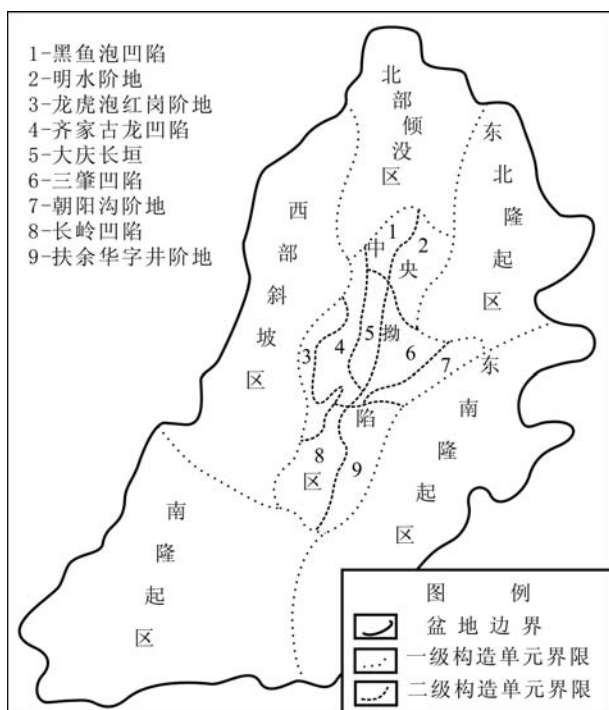


图1 松辽盆地构造区划图<sup>[21]</sup>

Fig.1 Geotectonic map of the Songliao Basin<sup>[21]</sup>

松辽盆地沉积盖层主要由中、新生代碎屑岩系组成,最大厚度逾万米。白垩系厚达5 500余m,自下而上依次发育下白垩统的沙河子组、营城组、登娄库组和泉头组(自下而上为泉一段、泉二段、泉三段、泉四段);上白垩统的青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组。

松辽盆地中新世代形成演化大致经历了热隆张裂、裂陷、拗陷和萎缩褶皱4个阶段,它是白垩纪亚洲古陆上最大的湖盆,约有4~6个内陆水系流入湖中,湖盆经历了多次涨缩,湖水的最大覆盖面积曾超出了20万km<sup>2</sup>,具有多物源、多沉积体系、相带呈环带展布的特点<sup>[20]</sup>。下白垩统泉头组泉四段是松辽盆地青山口组大规模拗陷前期的一套以河流-三角洲沉积为主的砂泥岩组合。该期松辽盆地处于全盛的湖水扩张时期,发育有6大沉积体系。三肇凹陷主要受东北部拜泉-青冈沉积体系和西南沉积体系控制。东北沉积体系主要影响升平、徐家围子、榆树林北部地区;西南沉积体系主要影响头台、肇州、朝长-榆树林南部地区。由于古中央隆起带影响,呈

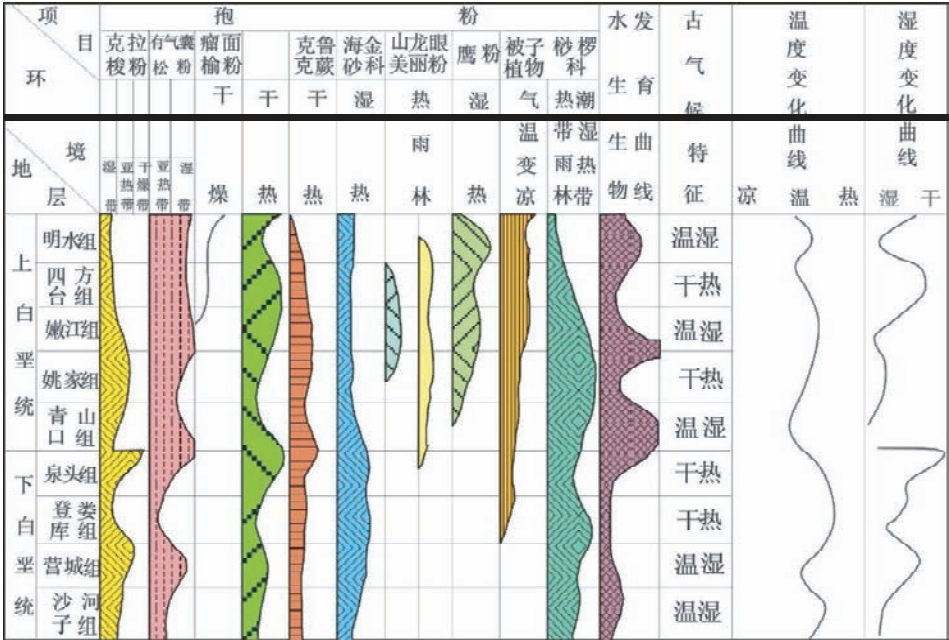


图 2 松辽盆地白垩纪古生物及古气候变化图<sup>[22]</sup>  
Fig. 2 Palaeontologic and palaeoclimate change of the Cretaceous in the Songliao Basin<sup>[22]</sup>

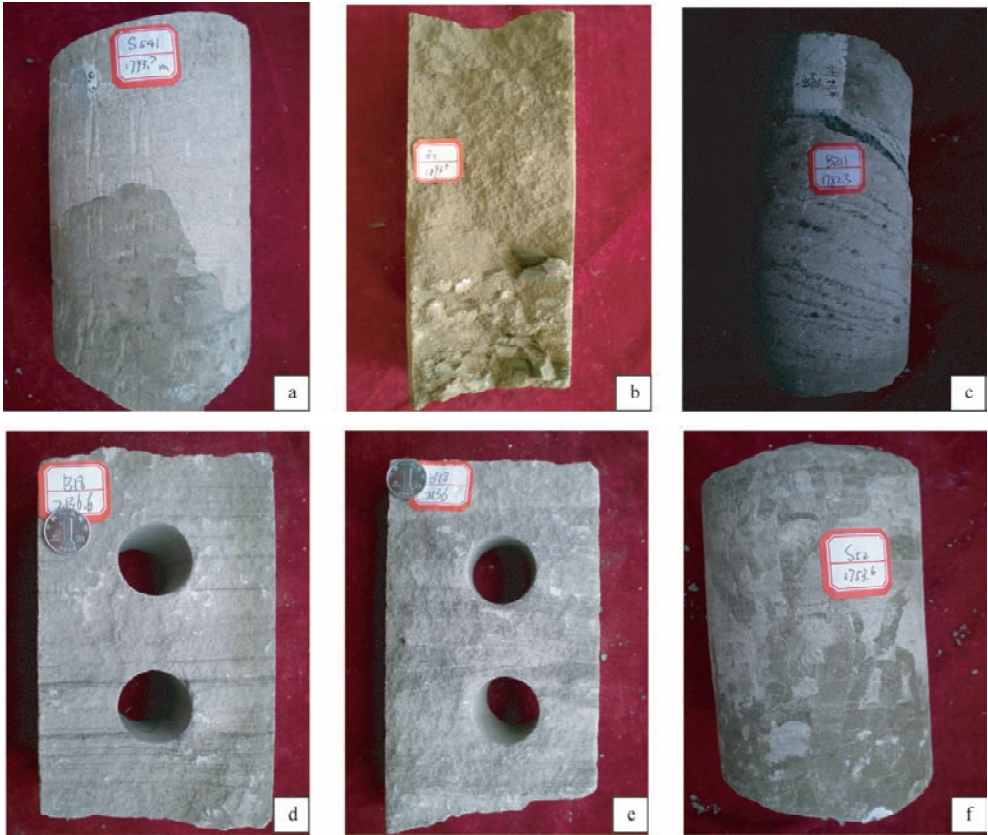


图 4 三肇凹陷白垩系泉头组浅水三角洲典型沉积构造  
Fig. 4 Typical sedimentary structures of the shallow delta of the Cretaceous Quantou Formation in the Sanzhao Sag  
a—灰白色细砂岩冲刷下伏灰绿色泥岩,冲刷面凹凸不平,升 541 井,1 739.7 m;b—灰白色含砾粗砂岩,底部滞留沉积,泥砾叠瓦状排列,州 7 井,1 893.5 m;c—富含顺层分布细砾的楔状交错层理砂岩,州 211 井,1 782.3 m;d—灰白色平行层理粉细砂岩,州 18 井,2 136.6 m;e—灰白色楔状交错层理粉细砂岩,州 18 井,2 136.0 m;f—灰绿色粉砂质泥岩,强烈生物扰动,升 52 井,1 753.6 m。

单、大小混杂的女星介属(*Cypridea*) (占总数的35%,壳面具大小不等浅蜂孔或壳面光滑)、玻璃介属(*Candona*) (占总数的30%,个体较小,侧视呈肾形,保存于紫红色、浅灰色泥岩中,个体保存完整,壳内多充填方解石)、蒙古金星介属(*Mongolocypis*) (占介形类总数的25%,壳面光滑,侧视呈长椭圆形)等。总之,三肇凹陷泉头组扶余油层介形类化石数量丰富,但品种单调,生物个体较小,壳面光滑,纹饰简单,仅少量具瘤状或乳头状突起;壳体保存相对完整,大小混杂堆积,推测为原地保存;加之与丰富的浅水型原地轮藻共生,说明泉头组泉四段属于滨浅湖沉积环境,湖泊分布范围与介形类化石的分布范围大致相同。岩性、古生物、沉积构造以及盆地类比分析表明,湖盆水体相对较浅(小于10 m),湖泊水动力能量较弱(美国全新世的Guadalupe三角洲是河流注入泻湖而成的一个近代浅水三角洲例子,该湖水深2~5 m)。同时,根据紫红色泥岩分布以及古生物组合特征,确定该时期湖泊面积变化较大,具有明显的古湖泊涨缩和旋回变化特征。

### 3 浅水三角洲沉积特征

#### 3.1 岩性细,成熟度中等,粒度概率曲线反映牵引流特征

据岩石特性分析,三肇凹陷白垩系扶余油层主要岩石类型为长石质岩屑细砂岩和岩屑细砂岩。颗粒成分主要有石英、长石和岩屑,其中石英颗粒含量占16%~40%,长石约占30%,岩屑占45%~70%。颗粒分选好,磨圆为次棱—次圆。总的来说,砂岩的成分成熟度偏低,结构成熟度中等—较好。

粒度概率曲线以两段式为主,表现为跳跃总体斜率较低、悬浮总体含量略高、细截点偏细,反映了浅水牵引流沉积特点(图3)。例如,浅水三角洲分流河道概率图是由跳跃总体和悬浮总体组成的两段式,跳跃总体含量在90%以上,斜率约60°,表明分流河道水动力相对较强。随着向三角洲前缘方向推进,水动力减弱,虽然概率图也呈两段式,但悬浮组分含量明显增多,水下分流河道的跳跃总体含量减少至75%左右,反映了水动力有所减弱的特点。

#### 3.2 砂岩中发育强水动力沉积构造

在三肇凹陷泉头组扶余油层中发育有丰富的、强水动力成因的沉积构造,如冲刷面、槽状交错层理、楔状交错层理、平行层理以及泥砾定向或叠瓦状

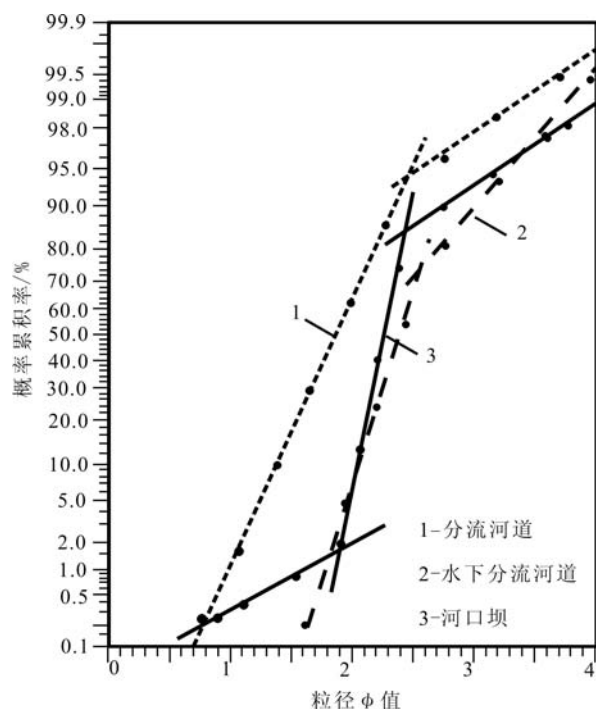


图3 三肇凹陷扶余油层砂岩粒度概率累积曲线

Fig. 3 Diagram of grain size probability of the Quantou Formation in the Sanzhao Sag

排列等(图4)。

浅水三角洲分流河道、水下分流河道微相的砂岩或砂砾岩底部常具有明显的冲刷面,主要有两种类型:凹凸不平的冲刷面、发育有底部滞留沉积的冲刷面。例如,分流河道冲刷下伏泥岩,形成凹凸不平的冲刷面(升541井,1 739.7 m);分流河道发育底部滞留沉积,可见泥砾呈叠瓦状排列(州7井,1 893.5 m),泥砾大小可达2.0 cm×4.0 cm;常见富含细砾楔状交错层理砂岩(州211井,1 782.3 m)、楔状交错层理粉细砂岩(州18井,2 136 m)、平行层理砂岩(州18井,2 136.6 m)以及垂向生物潜穴的粉砂质泥岩或粉砂岩(升52,1 753.6 m)等等。另外,也常见具单向斜纹层的细砾岩冲刷下伏细砂岩或中粗砂岩,所有这些沉积构造均反映了强水动力的浅水沉积环境(图4)。

#### 3.3 发育延伸远的、多叉的水下分流河道,不发育河口砂坝

在湖平面升降旋回变化过程中,形成分布范围广的浅水三角洲平原亚相和前缘亚相,分流河道、水下分流河道砂体形态极具特色,多次分叉,向盆地中央方向延伸逾20 km,甚至达100 km以上。浅水三角洲(如墨西哥湾Atchafalaya三角洲<sup>[7]</sup>)中三角洲平原分流河道不稳定,河道易于分叉、改道,三角洲平



原和前缘以分流河道发育为主。在三角洲不同亚相沉积区域,由于河水能量、地形坡度、湖浪作用等因素的差异,分流河道及水下分流河道内部成因单元、发育程度、叠置样式等方面常表现出不同的特点。沿浅水三角洲延伸方向,从平原到前缘,分流河道依次表现出以下特征(图 5)。

(1) 稳定性曲流型分流河道。该类型分流河道是由单一成因单元组成的向上变细的沉积序列,自下而上由冲刷面(含泥砾的滞留沉积)-大型槽状、楔状交错层理中、细砂岩-小型交错层理粉砂岩或水平层理粉砂岩-波纹层理粉砂岩构成,反映河道能量渐弱的沉积过程,通常向上逐渐过渡为波状层理的泥质粉砂岩、粉砂质泥岩的堤岸沉积-块状层理的紫色、杂色泥岩的泛滥平原沉积。该类型分流河道大多距离物源较近,垂向上叠置成间有泥岩的间断正韵律,如州 7 井 1 877.4~1 880.4 m 取心段等。

(2) 游荡性网状型分流河道。在浅水三角洲向湖盆推进过程中,受湖水顶托作用,分流河道不稳定性增加,导致河道的反复决口、改道、分叉,逐渐演变成更多条分流河道(可达 8~14 条分流河道),表现出网状河型沉积特征。该类型分流河道自下而上由具有冲刷面和滞留沉积的砾质砂岩-大型槽状交错层理中、细砂岩-小型交错层理粉砂岩构成,厚度通常较薄,反映出间歇性多期次的较

强水流作用,如芳 98-16 井 1 873~1 867 m 和芳 13 井 1 833.8~1 836.8 m 取心段等。

(3) 渐弱性改造型分流河道。该类型分流河道由多个较完整的成因单元叠覆而成,常见有以下两种成因单元:一种成因单元自下而上为具有冲刷面的含泥砾粉细砂岩-小型交错层理粉砂岩-沙纹层理泥质粉砂岩构成的正向成因单元,顶面常被湖浪改造,可见浪成波痕;另一种由浪成交错层理粉砂岩构成,呈薄层状。两种不同成因单元的不规则叠置构成了水下分流河道沉积组合的砂泥间互序列,反映了河流作用的间歇性与湖泊作用的持续性(可进一步形成广泛分布的前缘席状砂)。在该类型分流河道沉积物中,可见强烈生物扰动,或含淡水生物化石,如芳 13 井 1 830~1 832.9 m 取心段(图 5)。

另外,由于河流能量较强,三角洲前积速率过快,导致早期沉积的河口坝砂体被后期的水下分流河道冲刷侵蚀,河口坝消失殆尽。因此,浅水三角洲的河口坝不发育,亦很难见到远砂坝沉积微相。

3.4 紫红色泥岩大面积展布,生物扰动强烈,岸线迁移明显

岩心观察发现,除泉头组扶余油层扶一段顶部的泥岩颜色以灰黑色、灰绿色为主外,其他层段的泥岩大多以大面积分布的紫红色、红色为主,常见钙质团块,反映了水体较浅的氧化-弱氧化环境。

图 5 三肇凹陷泉头组浅水三角洲间断正韵律

Fig. 5 Discontinuous normal rhythm of the shallow delta of the Quantou Formation in the Sanzhao Sag

在浅水三角洲的粉砂质泥岩、泥岩中,发现有强烈的生物扰动现象,虫孔多为直立或斜立,且多被紫红色泥岩充填,表明当时沉积水体较浅,水体动荡,氧气充分,营养丰富,利于生物生存繁殖(图 4f)。

在精细层序地层格架中,紫红色泥岩和生物扰动的粉砂质泥岩分布图表明,其分布面积或大或小发生了周期性变化,进而表明了湖平面发生了周期性变化,由于盆地稳定沉降、坡度平缓,造成岸线横向迁移达数十公里,导致三角洲平原河道可以在湖平面下降期间,向湖盆中央方向推进几十至上百公里。

### 3.5 垂向上多个间断正韵律相互叠置,表明在频繁湖平面升降期间的较强河流冲刷作用

三肇凹陷泉头组垂向上发育有多个相互叠置的间断正韵律,反映了较强水动力条件下的浅水三角洲分流河道不断迁移、冲刷和叠置的沉积过程(图 5)。

浅水三角洲发育的间断正韵律在垂向上主要有泥岩的间断正韵律叠置和无泥岩的间断正韵律叠置两种叠置方式,两者之间的区别在于相邻两个间断正韵律之间是否存在泥质岩夹层。前者是相邻两个间断正韵律之间有泥岩夹层,夹层厚度不大,常小于 1 m;而单个正韵律厚度较大,垂向沉积序列自下而上依次为冲刷面→底部滞留沉积→槽状交错层理中细砂岩→楔状交错层理细砂岩→平行层理细砂岩→小型交错层理粉细砂岩→泥岩。该韵律是在可容空间增长速率相对较高的情形下形成的,多分布于三角洲平原亚相;厚度一般为 1.2~3.6 m;如州 7 井 1 877.4~1 881.6 m 取心段、芳 13 井 1 831.8~1 835.6 m 取心段等。后者多出现在砾质砂岩之中,如州 7 井 1 881.6~1 883.2 m 取心段、芳 98-16 井 1 867.6~1 872.8 m 取心段等,该间断正韵律单层沉积厚度薄,一般为 0.4~1.8 m;岩性相对粗,为含砾粗砂岩或砾质粗砂岩;沉积时水动力条件较强;下部正韵律泥岩多被冲刷,因而之间无泥岩夹层;每个正韵律自下而上为冲刷下伏层的砾质粗砂岩或含砾粗砂岩→块状砾质中粗砂岩和楔状交错层理砂岩→波状交错层理砂岩→具单向斜纹层的粉细砂岩(图 5)。该类韵律是在可容空间增长速率相对较低的情形下形成的,多分布于三角洲前缘亚相。

### 3.6 具有叠瓦状前积反射地震相,少见 S 形前积反射地震相

三肇凹陷泉头组沉积时期,湖底地形平坦,河流

携带充足的碎屑物质可进积推进很远,在三维地震剖面上的响应特征主要表现为叠瓦状地震相、未发现经典三角洲的 S 形前积反射地震相。

浅水三角洲形成时古地形平坦,一次洪水往往只形成一个薄层叶片状三角洲沉积体,多次洪水形成多个薄层叶片状三角洲沉积体,组成“叠瓦状”复合三角洲体,故对应地震剖面上的叠瓦状地震相(图 6)。

### 3.7 三角洲大面积稳定展布,单层厚度薄,砂地比值低

三肇凹陷泉头组发育的浅水三角洲存在多期性,沉积物总厚度约 270 m,分布面积可达 3 000 余  $\text{km}^2$ (图 7);沉积砂体单层厚度薄,砂地比值较低。以泉头组扶余油层 F I  $7_2$  沉积时间单元为例,浅水三角洲沉积物源来自三肇凹陷的北部和西南部地区,分流河道携带沉积物向凹陷中心汇聚并向东越出凹陷(敞流盆地,参见图 7);地层厚度不足 10 m,砂岩单层厚度小于 2.5 m;砂地比值低,在 0~0.65 变化,平均值为 0.35,随着向凹陷中心推进,水动力减弱,砂层厚度减薄,砂地比值降低。

## 4 浅水三角洲沉积模式及其与油气勘探开发关系

### 4.1 大型坳陷湖盆浅水三角洲沉积模式

对于在浅水缓坡沉积环境形成的三角洲而言,湖平面变化控制分流河道的形态与分布,气候变化对湖平面的升降产生重要影响,可引起三角洲沉积相带在平面上发生明显迁移和沉积特征的变化。因此,气候是浅水三角洲形成发育和展布形态的主要控制因素。

在干旱气候条件下,降水量减少,湖泊蒸发量大,湖盆发生收缩,河流沉积作用大范围发生,携带碎屑物质长距离搬运,在平缓地形上形成枝状三角洲(图 8)。该类三角洲具有以下沉积特点:三角洲平原亚相面积宽广,三角洲前缘亚相则较窄;分流河道以侧积为主,河道宽而浅,呈枝状分叉,河道分布相对稳定,易于横向对比;分流河道间泥岩沉积物为紫红色或杂色块状泥岩,伴有石膏团块、钙质结核等。以泉头组扶余油层 F I  $7_2$  沉积时间单元为例(图 7),沉积中心位于三肇凹陷以东地区,凹陷内部主要为三角洲平原亚相沉积,紫红色泥岩在全区稳定分布(大于 2 000  $\text{km}^2$ );分流河道分叉相对较少,呈枝状展布,研究区内延伸距离远,均在 20 km 以

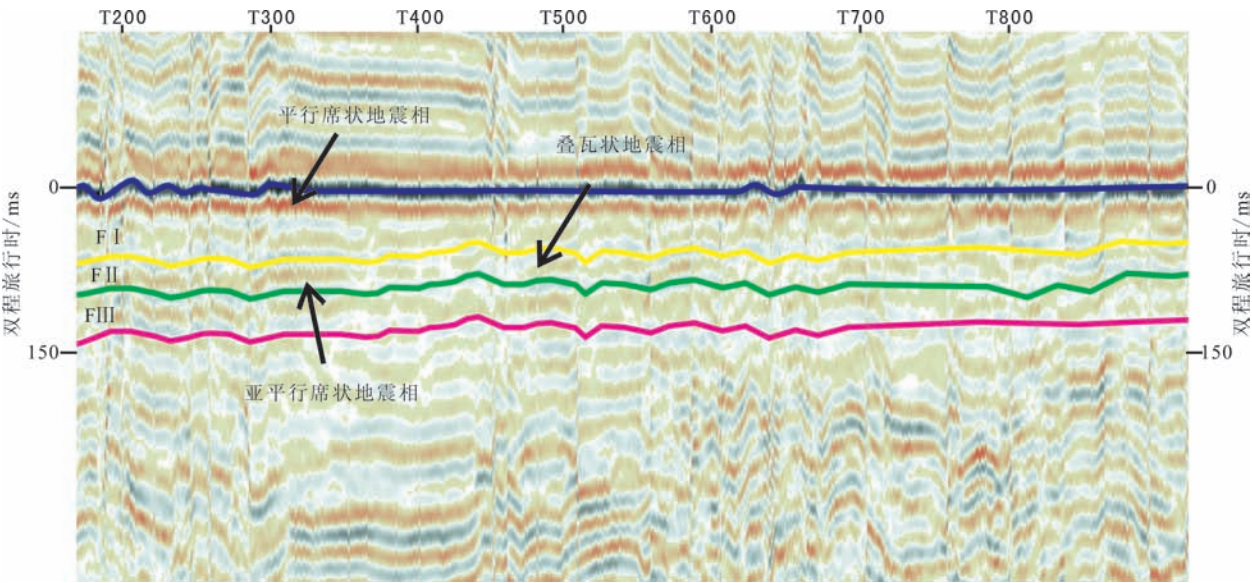


图 6 三肇凹陷泉四段地震相特征

Fig. 6 Seismic facies of the 4th Member of the Quantou Formation in the Sanzhao Sag 沿扶余油层顶部拉平,LINE828 测线。

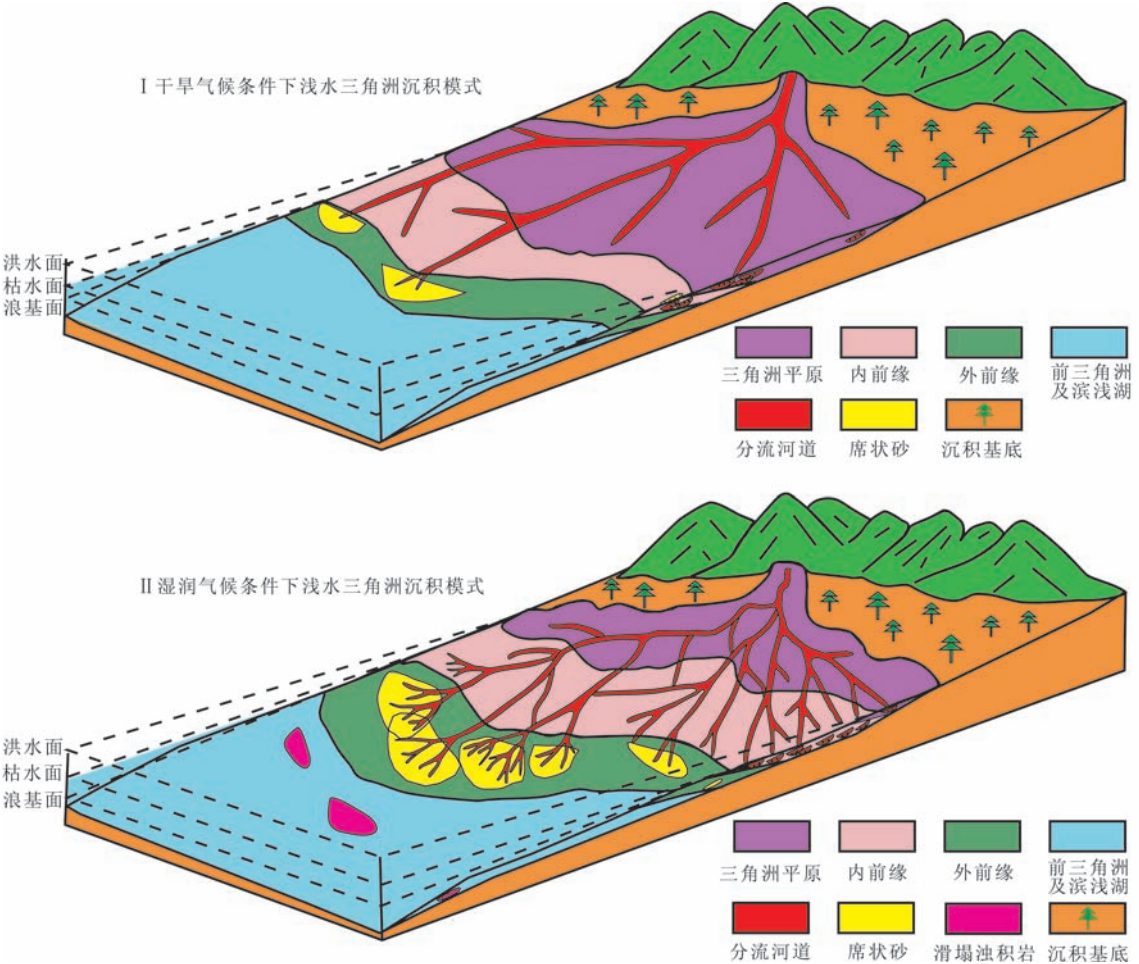


图 8 不同气候条件下浅水三角洲沉积模式

Fig. 8 Depositional models of shallow delta in different climate environments



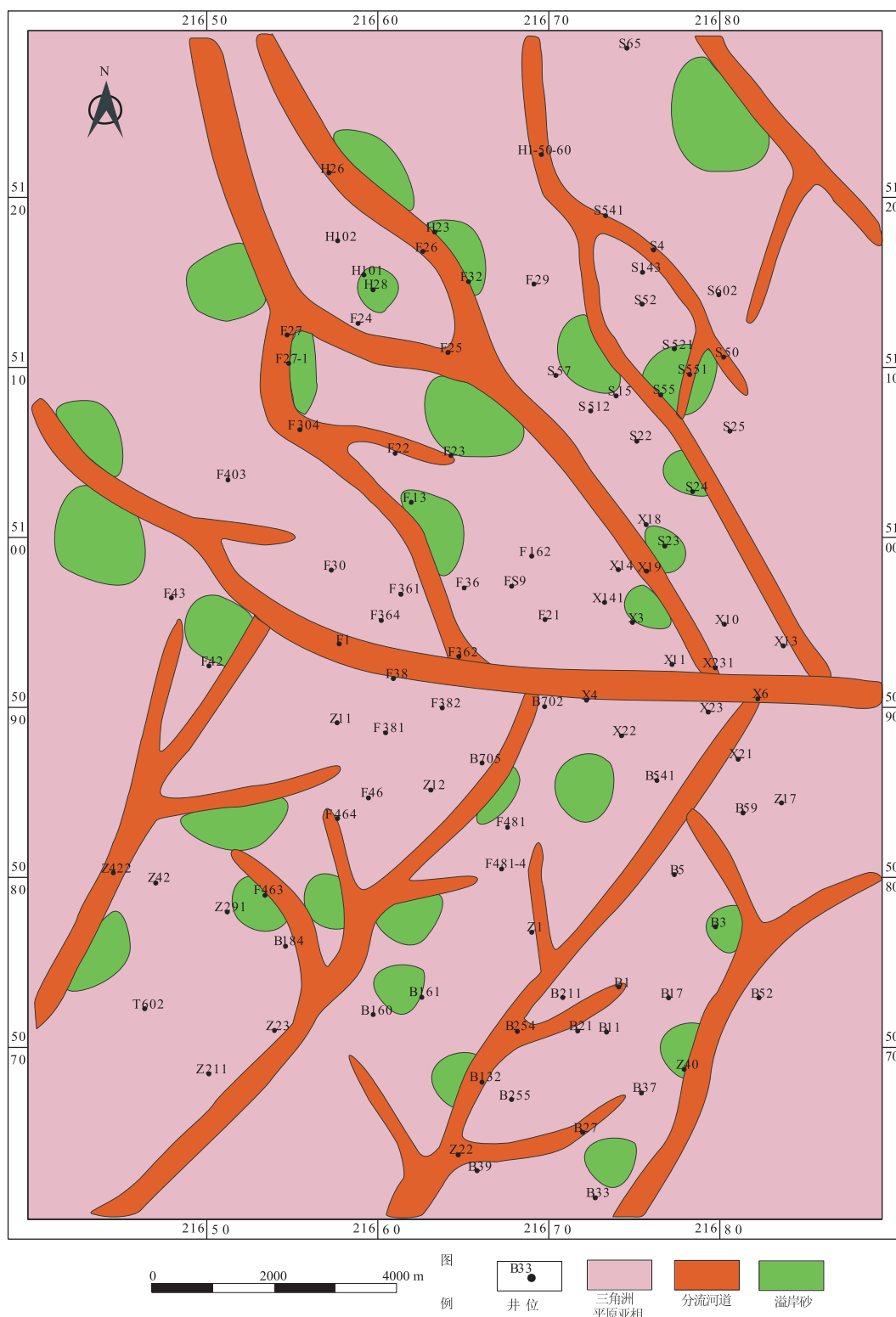
图7 三肇凹陷泉四段FI7<sub>2</sub>小层沉积相平面展布图

Fig. 7 Sedimentary facies plat of FI7<sub>2</sub> of the 4th member of the Quantou Formation in the Sanzhao Sag

上,河道宽度大多为 800~2 000 m;分流河道砂体单层厚度平均值约 2.3 m,砂地比平均值为 0.35;来自西南方向和北部物源体系的分流河道于徐家围子

地区汇聚并向东越过朝阳沟地区注入古松花江(敞流盆地)。

在湿润气候条件下,降水量增加,湖盆发生扩

张, 沉积中心距物源区较近。河流由于受到湖水的阻碍作用, 流速迅速降低, 分流河道不断改道、分叉, 形成网状三角洲沉积(图 8)。该类三角洲前缘相带宽广, 可将三角洲前缘划分为内前缘与外前缘; 水下分流河道以垂向加积为主, 河道相对窄而深, 且频繁分叉、改道, 呈网状展布, 难于横向对比; 分流河道间泥岩沉积物以灰绿色泥岩为主, 夹有薄层灰白色粉砂岩、泥质粉砂岩, 具有虫孔、波痕以及黄铁矿等。以泉头组扶余油层 F I<sub>12</sub> 为例, 三肇凹陷主体以三角洲前缘亚相沉积为主, 水下分流河道间泥岩颜色以灰绿色为主, 分流河道频繁改道分叉, 在研究区内的延伸距离小于 15 km, 河道宽度大多为 500~1 600 m; 分流河道砂体单层厚度平均值为 2.8 m, 砂地比平均值为 0.40; 物源来自西南方向和北部并于徐家围子地区汇聚于半深湖-深湖沉积环境。

#### 4.2 与油气勘探开发的关系

三肇凹陷泉四段浅水三角洲发育横向多变的分流河道、水下分流河道砂体, 为形成大面积岩性油气藏提供了有利的储集空间。这些多变的分流河道砂体具有以下地质特征: (1) 分流河道砂体分布范围广, 砂体呈条带状或断续条带状展布, 宽度一般为 500~1 000 m, 延伸距离多在 20 km 以上; (2) 单一砂体规模小, 分流河道砂体单层呈透镜状或薄层状, 单层厚度为 1.5~4.0 m, 砂地比值的平均值为 35%; (3) 多条砂体纵向叠置, 横向上错叠连片, 由于分流河道不断迁移改道、南北多物源交汇, 以及多期河道砂体的纵向叠置, 形成了大面积错叠连片的砂体分布格局, 单砂体与单砂体之间在平面和纵向上连通性很差或不连通; (4) 岩性相对较细, 储层物性偏差, 储层的岩石类型以长石质岩屑细砂岩和岩屑细砂岩为主, 泥质含量约 8%~15%, 孔隙度一般为 10%~15%, 渗透率大多为  $(0.1\sim5)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 这些薄层砂体构成了油气储集空间。

同时, 由于泉头组浅水三角洲位于烃源岩青一段泥岩之下, 与这套最大湖泛期形成的烃源岩构成了有效的生储盖组合; 加之后期构造运动产生的大量断层增大了砂岩储集体与烃源岩的接触面积, 有利于形成断块-岩性油气藏。所以三肇凹陷白垩系扶余油层是目前和今后松辽盆地勘探的主要目的层之一。因此, 利用岩心、测井、地震等资料, 通过层序地层学和沉积学的研究, 预测砂体的发育部位, 对后期勘探开发具有重要的指导意义。

## 5 结论和讨论

三肇凹陷泉头组沉积时期, 盆地基底整体稳定下降, 盆广坡缓、古气候炎热干旱、源区物理风化作用强烈、古水体较浅、湖平面波动频繁、岸线横向迁移明显, 又有敞流盆地特征, 具备了发育大型浅水三角洲的有利地质条件。

三肇凹陷泉头组浅水三角洲发育多叉的分流河道, 河道分布广, 延伸远, 与吉尔伯特型三角洲沉积特征(岩性细, 成熟度中等, 粒度概率曲线反映牵引流的地质特征)存在差异; 砂岩中发育有丰富的强水动力沉积构造; 紫红色泥岩大面积展布, 生物扰动强烈; 垂向上多个间断正韵律相互叠置, 三角洲三层式结构不明显; 具有叠瓦状前积反射地震特征; 三角洲大面积稳定展布, 砂地比值低; 发育分叉多变的分流河道、水下分流河道以及广泛分布的席状砂, 不发育河口坝。

气候是浅水三角洲展布形态的主控因素。在干旱气候条件下, 湖泊收缩, 河流携带碎屑物质长距离搬运, 形成平原占主体的枝状三角洲; 在湿润气候条件下, 湖泊扩张, 受湖泊顶托作用, 河道频繁分叉、改道, 形成前缘占主体的网状三角洲。

浅水三角洲分流河道砂体分布广, 纵向上叠置, 横向上连片, 构成有利的油气储集体。并常与最大湖泛期形成的泥质烃源岩一起构成有效生储盖组合。大量勘探实践证明, 坳陷型湖盆大面积浅水三角洲是岩性油气藏勘探开发的重要目标。

浅水沉积环境发育的三角洲是当今国际沉积学研究热点, 但还有许多沉积学问题需要进一步深入探讨。比如, 浅水三角洲可发育于什么类型的沉积盆地, 形成浅水三角洲应具有什么沉积背景, 什么类型的河流进入盆地可形成浅水三角洲, 浅水三角洲的沉积动力学过程, 浅水三角洲向前推进的方式, 浅水三角洲经典露头和现代沉积解剖, 浅水三角洲各沉积相带内部沉积微相空间配置关系以及内部构成, 不同成因浅水三角洲的亚微相划分和平面形态, 以及浅水三角洲沉积模式与沉积矿产勘探开发之间的关系等。

#### 参考文献

- [1] Fisk H N. Sedimentary framework of the Modern Mississippi Delta[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1954, 24(2):

- 76-99.
- [2] Donaldson A C. Pennsylvanian sedimentation of central Appalachians[J]. Geological Society of America Special Paper, 1974, 148: 47-48.
- [3] Postma G. An analysis of the variation in delta architecture [J]. Terra Nova, 1990, 2(2): 124-130.
- [4] Lemons D R, Chan M A. Facies architecture and sequence stratigraphy of fine-grained lacustrine deltas along the eastern margin of late Pleistocene Lake Bonneville, northern Utah and southern Idaho[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(4): 635-665.
- [5] Plint A G. Sequence stratigraphy and paleogeography of a Cenomanian deltaic complex: The Dunvegan and lower Kaskapau formations in subsurface and outcrop, Alberta and British Columbia, Canada[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2000, 48(1): 43-79.
- [6] Hoy R G, Ridgway K D. Sedimentology and sequence stratigraphy of fan-delta and river-delta deposystems, Pennsylvanian Minturn Formation, Colorado [J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(7): 1169-1191.
- [7] Cornel O, Janok P B. Terminal distributary channels and delta front architecture of river-dominated delta systems [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76: 212-233.
- [8] Keumsuk L, McMechan G A, Gani M R, et al. 3-D architecture and sequence stratigraphic evolution of a forced regressive top-truncated mixed-influenced delta, Cretaceous Wall Creek sandstone, Wyoming, U. S. A [J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(4): 284-302.
- [9] 龚绍礼. 河南禹县早二叠世晚期一浅水三角洲沉积和聚煤环境[J]. 煤田地质与勘探, 1986, 13(6): 2-9.
- [10] 赵翰卿. 松江盆地大型叶状三角洲沉积模式[J]. 大庆石油地质与开发, 1987, 6(4): 1-10.
- [11] 梅志超. 湖泊三角洲的地层模式和骨架砂体的特征[J]. 沉积学报, 1991, 9(4): 1-11.
- [12] 楼章华. 地形、气候与湖面波动对浅水三角洲沉积环境的控制作用: 以松辽盆地北部东区葡萄花油层为例[J]. 地质学报, 1999, 73(1): 83-92.
- [13] 徐长贵. 渤海中坳陷上第三系三角洲的发现、沉积特征及其油气勘探意义[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 588-594.
- [14] 杨东明. 济阳坳陷馆陶组辫状三角洲-浅水湖泊沉积体系[J]. 西安石油大学学报, 2004, 19(6): 15-19.
- [15] 楼章华. 松辽盆地北部浅水三角洲前缘砂体类型、特征与沉积动力学过程分析[J]. 浙江大学学报, 2004, 31(2): 211-215.
- [16] 邢厚松. 鄂尔多斯盆地中东部下二叠统山西组二段沉积相[J]. 石油实验地质, 2008, 30(4): 345-351.
- [17] 朱伟林. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探[J]. 沉积学报, 2008, 26(4): 575-582.
- [18] 朱筱敏. 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.
- [19] 邹才能. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 813-825.
- [20] 高瑞祺, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 25-28.
- [21] 谭保祥, 侯德艳, 林景晔. 三肇地区扶余油层油气藏分布规律及勘探前景分析[J]. 石油勘探与开发. 1995, 22(1): 1-5.
- [22] 大庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志卷二(上册)大庆油田[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 155-160.