

文章编号: 1000-0550(1999)04-0572-06

# 松辽大型浅水湖盆三角洲 沉积特征及前缘相储层结构模型<sup>①</sup>

吕晓光<sup>1</sup> 李长山<sup>1</sup> 蔡希源<sup>1</sup> 李伯虎<sup>2</sup> 赵翰卿<sup>2</sup>

1(中国地质大学 北京 100083)

2(大庆石油管理局勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

**摘要** 松辽湖盆具有大、浅、缓、湖面波动迅速、波浪作用带宽和能量较弱的特点,形成了北部富有特色的大型河流三角洲沉积物。这一三角洲在垂向层序、骨架砂体类型、规模等诸多方面与海相三角洲相比都有很大差别,而更多的表现为浅水三角洲的特征。前缘相砂体具有明显的条带方向性,前缘相骨架砂体为水下河道沉积,缺乏典型的厚层反韵律的河口坝砂体。垂向上层序不连续,典型的三层结构特征不明显。在前缘相内可进一步划分出包括水下河道和席状砂组合的内前缘相沉积和以席状砂为主的外前缘相沉积。不同层段和亚相位置出现相应的砂体类型,每一类型砂体与泥岩在空间有规律的组合,形成了特定的储层空间分布结构,为储层结构模型的建立提供了基础。以砂体密度、夹层密度和有效砂岩系数等定量参数结合砂体组合形式、相带位置等成因特征,前缘相储层 5 类结构模型:即孤立水道型,叠加水道型,不稳定互层型,稳定互层型,孤立薄层型。

**关键词** 松辽湖盆 浅水三角洲 沉积特征 水下河道 前缘相

**第一作者简介** 吕晓光 男 1966 年出生 博士 储层沉积学

**中图分类号** P618.130.2<sup>+</sup>1

**文献标识码** A

## 1 引言

早白垩中晚期松辽盆地已发育成为统一的大型拗陷盆地,沿湖盆纵向长轴出现冲击扇—辫状河—曲流河—三角洲—湖相泥岩充填模式<sup>[1]</sup>,在盆地北部形成了大型复合河流—三角洲沉积体系。此时,正处于青山口水退的晚期与姚家至嫩江组水进的早期,为总体拗陷过程中的一个显著充填时期。三角洲沉积区地形平坦,湖面开阔,水体很浅,形成了富有特色的大型浅水三角洲。

古代三角洲的研究始于 Gilbert 对 Bonneville 湖更新世三角洲的描述。国外研究者根据现代沉积研究提出了多种三角洲沉积模式<sup>[2]</sup>。Fisk 最早提出了浅水三角洲的概念,Donaldson 等在研究石炭纪陆表海时发现水深是一个重要控制因素,并进一步总结了浅水三角洲的概念<sup>[3]</sup>。

我国湖盆体系含有丰富的油气资源,石油工业发展的需要促进了对湖盆三角洲的研究,并取得了长足进展<sup>[1]</sup>。特别是近年来对浅水三角洲的研究日益增多<sup>[4~8]</sup>。对松辽大型河流—三角洲的研究

始于 70 年代,主要以密西西比现代河控三角洲为模式,总结提出了鸟足状三角洲,朵状三角洲和席状三角洲三种基本类型。实际上,这一三角洲在垂向层序、骨架砂体类型、规模等诸多方面与海相三角洲相比都差别很大,更多的表现为浅水三角洲的特征。又由于该三角洲具有大、浅、缓、湖面波动迅速、波浪作用带宽的特点,与我国其它陆相断陷小湖盆浅水三角洲相比也具有自己的特征。深入研究其沉积规律,建立储层结构模型对于丰富陆相浅水湖盆三角洲的沉积学知识及指导油田开发的调整挖潜具有理论和现实意义。

## 2 松辽大型浅水湖盆三角洲沉积特征

### 2.1 具高建设河控三角洲的沉积特征

三角洲的沉积特征是河流和水盆能量相互作用的结果。松辽湖盆为大型浅水湖盆,地形非常平缓,研究结果表明其坡度不足  $0.1^\circ$ <sup>[9]</sup>,入湖水携带大量泥砂可以一直推进到前缘很远的地方。例如大庆长垣萨 II7—9 第二单元窄条带断续分布的水下分流河道砂体,在前缘相延续 20km 以上,又如在湖

① 九五国家课题三角洲前缘相储层精细地质模型(95-109-01-01-05-02)成果

收稿日期: 1998-04-10 收修改稿日期: 1999-05-18

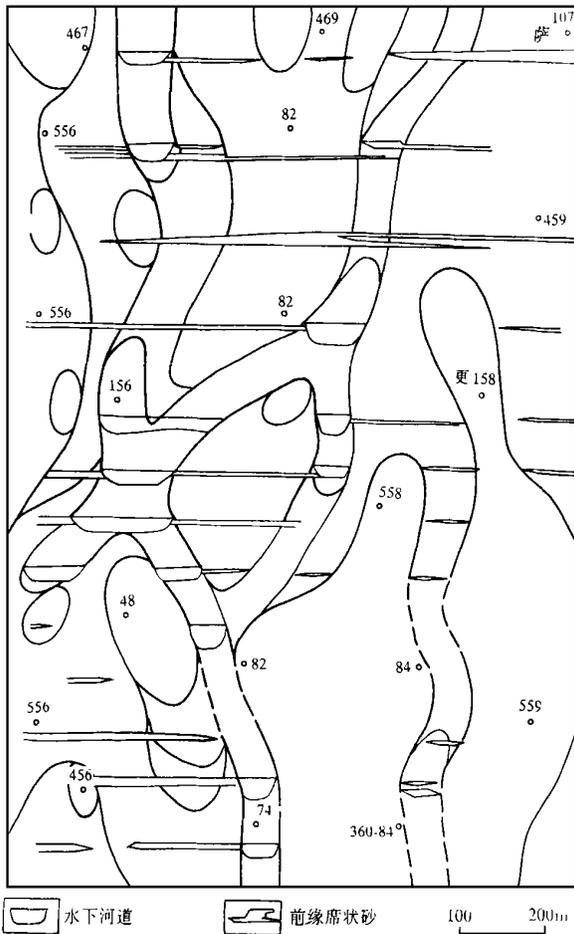


图1 示出三角洲前缘相主体席状砂具明显的条带方向性  
Fig. 1 Showing the main sheet sandbody in delta front

盆萎缩的极浅水时期,以水下河道为骨架的砂体分布范围达40 km。前缘相砂体具有方向性,这种方向性不仅表现在水下河道上,根据近期密井网精细地质研究成果,甚至前缘席状砂同样具有条带方向性(图1)。同样不仅在湖退和稳定期,甚至在湖进期仍可形成建设性三角洲。

## 2.2 前缘相的骨架砂体特征

松辽盆地北部浅水三角洲沉积物中,在前缘相靠近湖岸线的10~20 km的范围内,相对较厚的单一成因砂体不是厚层的反韵律的河口坝砂体,而是具有明显垂向加积特征的窄条带的水下河道沉积物。水下河道为分流河道入湖后的延伸部分,它与分流河道砂具有许多相似之处,所不同的是水下河道砂侧向上与之伴生的是经湖浪改造的席状砂,较高渗透率段一般在油层中下部(图2)。大量古代和现代三角洲研究表明,如吐鲁番—哈密盆地浅水三角洲的突出特征是以分流河道砂体为骨架,河口坝

不发育<sup>[7]</sup>,又如鄂尔多斯盆地的缓坡三角洲露头研究结果,水下河道砂体上下均为三角洲前缘的砂泥互层沉积,河道底部切割了下伏沉积物<sup>[5]</sup>。对鄱阳湖<sup>[10]</sup>、洞庭湖的研究结果表明水下河道是大河进入浅水湖盆的常见现象。同样,对内蒙岱海缓坡三角洲一步量河三角洲的现代沉积调查也表明前缘相的主要微相是水下河道和席状砂<sup>[11]</sup>。

## 2.3 垂向上层序不连续

松辽大型浅水三角洲沉积物中,由于湖水大幅度快速扩张和收缩,加之高建设性河控作用的特点,分流河道可直接覆盖于前三角洲泥之上,局部缺失三角洲前缘相沉积,造成垂向上相序不连续。

## 2.4 单一河道砂体厚度薄

松辽大型浅水三角洲水下河道厚度一般2~5 m。席状砂单层厚度小于2 m,多在0.4~1.0 m之间。单一砂体厚度薄同样可能是浅水三角洲的共同特征。如美国全新世的Guadalupe三角洲前缘,平均厚度1 m,最厚处2.4 m,而分流河道砂体却厚达5 m,并与湖底呈冲刷接触。

## 2.5 相带分异完善

由于斜坡长,坡度缓,松辽大型浅水三角洲砂体广布,相带宽阔,分异完善。如主要根据骨架砂体的变化可划分出泛滥分流平原相和前缘相。在前缘相内根据骨架砂体的延伸情况进一步细分出内前缘相和外前缘相。其中内前缘相包括了水下河道和席状砂的组合,而外前缘相则主要以席状砂沉积为主。

## 2.6 河控建设性三角洲背景下的三角洲砂体分类

在松辽湖盆这类大而浅的湖盆中,无论是在水进还是水退过程中,总是伴随反复的过程。例如由姚家组到嫩江组一段,在总体水进、沉积物粒度变细的背景上,形成了姚家组底部一个以水进为主的正旋回及其以上两个由水退到水进的复合旋回沉积,在这每一旋回中还可以进一步细划出更次一级的水进、水退或复合旋回。由于地形平坦,所以湖面即使很小的升降变化,都可能导致湖岸线位置的摆动,加之物源供给、气候变化等多种因素的共同作用,水进水退频繁,由此形成了不同的宏观三角洲几何形态和砂体组合类型。以内前缘相砂体组合为依据,可划分为四种主要类型。

坨状三角洲砂体。主要特点是内前缘相中水下河道呈断续的坨状,条带状分布,水下河道间为大面积的席状砂,并以相对较厚的主体席状砂为主。砂体形成时期水域覆盖面积较大,碎屑供给丰富,湖盆

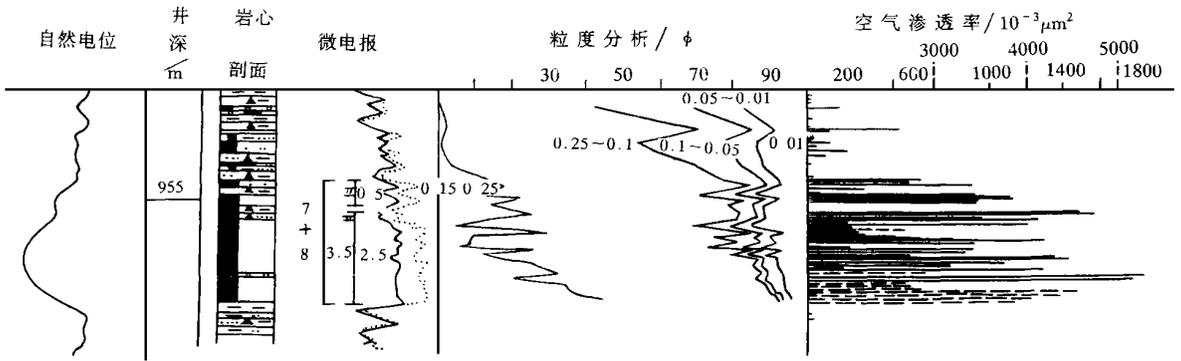


图2 水下河道垂向层序特征(萨184井萨II7+8)

Fig. 2 Vertical sequence characteristic of subaqueous channel (Layer SH7+8, well 184 Daqing oilfield)

波浪的改造作用也较强。

枝状三角洲砂体。内前缘水下河道呈条带状,并为薄层砂所连接,成为复杂的枝状。水道间为大片泥岩充填。一般形成于湖盆极度萎缩,水体极浅的时期,且碎屑供给不足。

过渡状三角洲砂体。内前缘砂体发育介于上述两类砂体之间,水下河道呈更窄的条带状,其间分布极薄的非主体席状砂。三角洲形成时期,湖泊水体有所增加,波浪改造作用相对增强,但河流作用则相对较弱。

席状三角洲砂体。前缘相整体为一席状,沉积时期,河流作用较弱,碎屑供给不足,而湖泊的改造作用则较强,具有破坏性三角洲的特征。

上述沉积特征导致不同层段和亚相位置出现相应的砂体类型,砂体与泥岩在空间有规律的组合,即形成了特定的储层空间分布结构,以此为储层结构模型的建立提供了成因基础。

### 3 前缘相储层结构模型

#### 3.1 建模方法及结构模型类型

储层的结构模型又称骨架模型(Framework model),指的是砂体的几何形态及其在三维空间上的展布,是砂体连通性及砂体与渗流屏障空间组合分布的表征<sup>[12]</sup>。Weber等<sup>[13]</sup>主要针对海相碎屑岩储层按照砂岩在空间上的叠置与展布特点划分为3种基本类型。即:千层饼式结构,迷宫状结构,拼合结构。于兴河<sup>[14]</sup>等则根据陆相断陷湖盆储层空间分布的特征补充提出了第4种结构,即夹心式结构。但大型浅水三角洲特定的沉积特点及由此形成的不

同砂体类型导致其空间结构也是多样的,为精细认识其空间结构分布特征,需建立具体的储层结构模型,储层结构模型的划分应基于:

- (1) 具体储层的成因特点,不同砂体类型是其成因的直接反应;
- (2) 反映出砂体在三维空间上的连通特点;
- (3) 采用一定的定量参数加以表征。

本文采用以下三个参数对储层结构模型进行表征和分类。

$$\text{砂体密度 } D = S / T \quad (1)$$

式中  $S$  为层段砂岩厚度, m;  $T$  为层段地层总厚度, m。这一参数既含有砂体骨架,又含有储层宏观非均质性的概念,便于储层地质模型研究<sup>[15]</sup>。事实上人们早已应用这一参数进行三维连通性的表征<sup>[16, 17]</sup>。

$$\text{夹层密度 } F = N / T \quad (2)$$

式中  $N$  为,砂层间夹层的条数,这一参数反映储层的分层情况,与砂岩密度结合可分析储层的发育情况及三维连通性。

$$\text{有效砂岩系数 } C = S_e / S \quad (3)$$

式中  $S_e$  为有效砂岩厚度, m。  $C$  越大,表明有效砂岩所占的比例越高,储层性质越好。

根据以上参数,综合考虑各层段的砂体组合,前缘相位置及三维连通性,可划分为5类结构模型(表1)。

(1) 孤立水道型(图3)。主要由枝状三角洲砂体组成,发育水下河道和少量水道间薄层砂两种微相,单一水道几十米到200m之间,但在交会处可达500~600m,水道在剖面上呈孤立的透镜状,平面

表 1 大型浅水三角洲前缘相储层结构模型特征

Table 1 Characteristics of reservoir framework model in large shallow water delta front facies

模型类型	平均夹层密度 (条/m)	平均砂体密度	平均有效砂岩系数	平面主要砂体类型、相带位置	主要微相	三维连通性
孤立水道型	0.18	0.25	0.68	枝状 三角洲砂体	水下河 道水道间薄层砂	透镜状, 局部连通或不连通 水下河道相互切割或切割席状砂, 连通较好
叠加水道型	0.30	0.65	0.87	坨状 三角洲砂体	水下河 道、前缘席状砂	好
不稳定互层型	0.46	0.51	0.52	三角洲砂体 过渡状	水下河 道、前缘席状砂	水下河道切割部分席状砂, 局部连通
稳定互层型	0.47	0.35	0.48	三角洲砂体 席状三角洲砂体 三角洲外前缘相	外前缘 相席状砂	侧向连通较好, 垂向一般不连通
孤立薄层型	0.03	0.05	0.13	三角洲外前缘相 外侧	外前缘 相席状砂	孤立薄层砂, 三维连通差

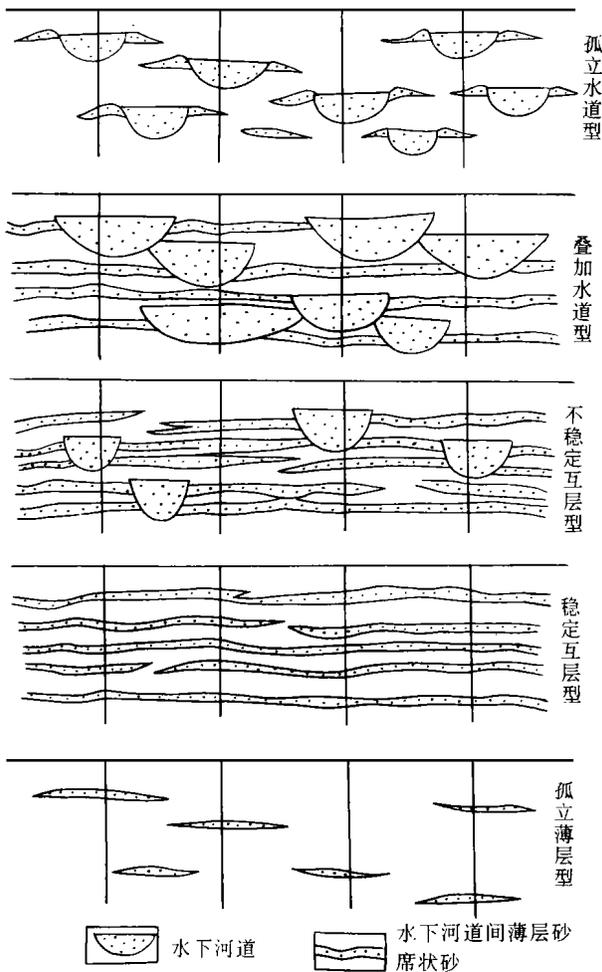


图 3 大型浅水三角洲前缘相储层结构模型

Fig. 3 Framework model of delta front facies of large shallow water delta

上为不规则的窄条带状并与薄层砂连接成为完整的枝状。300 m 井网对砂体的控制程度较。平均砂体密度 0.25, 按照 Allen 提出的连通性定量模型<sup>[18]</sup>, 当  $D < 0.3$  时, 砂体在三维空间上的连通性已相当差。平均夹层密度  $F = 0.18$ , 平均有效砂岩系数  $C = 0.68$ , 表明储层分层性差, 但性质相对较好。

(2) 叠加水道型。分布于内前缘相靠近湖岸线的河口部位, 主要砂体类型为坨状三角洲砂体, 发育水下河道和主体席状砂。平均有效砂岩系数达 0.87, 是三角洲前缘相中储层性质最好的一类储层。水下河道相对较宽, 相互切割或切割席状砂。平均砂体密度  $D = 0.65$ , 平均夹层密度  $D = 0.30$ , 砂体在三维空间上连通较好。

(3) 不稳定互层型。砂体类型包括坨状三角洲砂体和过度状三角洲砂体, 水下河道相对较窄, 宽度从几十米到 250 m 之间, 呈窄条带状分布, 并切割部分席状砂。砂体的平均夹层密度 0.46 条/m, 说明层数较多。平均砂体密度  $D = 0.51$ 。总体看侧向上连通较好, 垂向上只局部连通。

(4) 稳定互层型。席状三角洲砂体或其它各类砂体的外前缘相易形成这类储层结构, 砂体在平面上呈较大面积分布, 剖面上呈砂泥互层状, 以席状砂为主, 夹层密度 0.47 条/m, 分层性最好。平均砂体密度  $D = 0.35$ , 砂体在平面上连续性较好, 垂向上一般不连通。

(5) 孤立薄层型。分布于各类三角洲砂体外前缘相外侧, 砂体不发育, 为一些孤立的薄层砂或远端

砂坝。平均砂体密度0.05,有效砂岩系数 $C=0.13$ ,在三维空间上砂体的连通性极差,只有100 m以下的井距才能对砂体加以控制。

### 3.2 储层结构模型与宏观剩余油分布的关系

这里的宏观剩余油指未遭受水驱或弱水驱的剩余油。

孤立水道型储层,在三维空间上呈“迷宫状”,一些砂体宽度只有几十米,井距较大的井网很难控制住。有的砂体无井钻遇或注采不完善,形成局部条带或坨状的剩余油富集区。孤立薄层型储层,侧向延伸长度短,100 m井距的井也很难完全钻遇。但这类储层物性差,储量少,需结合其它层系采油井进行挖潜。叠加水道型储层,三维连通性好,且储层性质好,大部分油层已遭受水驱,剩余油很少分布。不稳定互层型储层,存在局部储层性质变差的小片剩余油区。稳定互层型储层,在大片物性变差区存在成片分布的剩余油,是挖潜的主要对象。

#### 参 考 文 献

- 1 裘亦楠. 中国陆相储层沉积学进展[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 16~24
- 2 Reading H G 主编, 周明鉴等译. 沉积环境和相[M]. 北京: 科学出版社, 1986, 131~159
- 3 Donaldson A C. Pennsylvanian sedimentation of central Appalachians. Spec. PaP. Geol. Soc. Am No. 148. 1974, 47~78
- 4 姚光庆, 马正, 赵彦超等. 浅水三角洲分流河道砂体储层特征[J]. 石油学报, 1995, 16(1): 24~31

- 5 李思田. 含能源盆地沉积体系—中国陆相和近海主要沉积体系类型的分析[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996, 62~67
- 6 梅志超, 林晋炎. 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
- 7 李文厚, 林晋炎, 袁明生等. 吐鲁番—哈密盆地的两种粗碎屑三角洲[J]. 沉积学报, 1996, 14(3): 113~121
- 8 辛仁臣, 王文广, 孙英杰. 松辽盆地中生代三角洲类型, 主要控制因素及特征[A]. 见: 王英华等编: 沉积学及岩相古地理新进展[C]. 北京: 石油工业出版社, 1995, 154~156
- 9 刘丁增. 多油层砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1986, 12
- 10 朱海虹. 鄱阳湖现代三角洲沉积研究[J]. 石油与天然气地质, 1981, 2(2): 89~102
- 11 王德发, 郑浚茂, 于兴河. 内蒙古岱海湖现代三角洲沉积及储层研究[A]. 见: 裘亦楠等编, 中国油气储层研究论文集(续一)[C]. 北京: 石油工业出版社, 1993, 293~311
- 12 张一伟, 熊琦华, 王志章等. 陆相油藏描述[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997
- 13 Weber W J, Van Geuns L C. Framework for constructing elastic reservoir simulation models[M]. 1989, SPE19582
- 14 于兴河, 王德发. 陆相断陷盆地三角洲相构型要素及储层地质模型[J]. 地质论评, 1997, 43(3): 225~231
- 15 王寿庆. 扇三角洲模式[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993
- 16 Vande Graff W G E, Ealey P J. Geological modeling for simulation studies[J]. AAPG, 1989, 73(11): 1436~1444
- 17 裘亦楠. 储层沉积学工作流程[J]. 石油勘探与开发, 1990, 17(1): 85~90
- 18 Allen J R L. Studies in fluviate sedimentation, an exploratory quantitative model for the architecture of avulsion? controlled alluvial suites[J]. Sed. Geo. 1978, 21: 129~147

## Depositional Characteristics and Front Facies Reservoir Framework Model in SongLiao Shallow Lacustrine Delta

LU Xiao-guang<sup>1</sup> LI Chang-shan<sup>1</sup> CAI Xi-Yuan<sup>1</sup>

LI Bo-hu ZHAO Han-qing<sup>2</sup>

1 (China University of Geoscience Beijing 100083)

2 (Institute of Exploration and Development, Daqing Heilangjiang 163712)

### Abstract

Characterized by large area, shallow water, gentle slope, wide wave influencing belt, and weak energy, the SongLiao basin deposited a distinct large river-delta in its northern depositional system. The delta is different from other marine delta in vertical sequence, types of framework sandbody and scale etc. Instead, it presents more characteristics of shallow water delta. The delta is highly constructive fluvial-dominated, characterized by directional ribbon-like sandbody in front facies, and fluvial deposition can influence more than 20~30 kilometers under shoreline. Vertically, its sequence is discontinuous without three structure of typical

delta. The thickness of sandbody is thin, with that of subaqueous channel 2~5m, and that of sheet sand less than 2m. In general, facies belts are well developed in which front facies usually covers more than 30~40 kilometers, and the inner front including the microfacies of subaqueous and sheet sand, and the outer front facies including only the sheet sand can be subdivided. Various kinds of sandbody association are formed because of frequently transgression and regression. The above characteristics have resulted in corresponding sandbody types in various stratigraphy section and subfacies area. Distinct framework models are formed while each kind of sandbody associate with mud in 3D space, these provides a sound genetic basis for establishing framework model.

Based on the quantitative parameters such as density of sandbody, density of barrier, and coefficient of net sand, combining with the genetic features of sandbody associations and facies location, 5 types of framework models such as isolated channel pattern, stacked channel pattern, stable inter-bedded pattern, unstable inter-bedded pattern and isolated thin-layer pattern are put forward. The sandbody in isolated channel pattern is very narrow, and shows puzzled shape in 3D space, so it is easy to form small ribbon-like or lump-like oil-bearing area resulting from incompletely water driver under the condition of large well distance. Characterized by well-developped subaqueous channel and main sheet sand, large sandbody density, good reservoir quality and connectivity between sandbodies, most of recovery oil in stacked channel pattern has been produced. The main features of unstable inter-bedded pattern are its narrow subaqueous channel width and incised sheet sand, which result in good communication in later and poor connectivity in vertical. Remaining oil only exists in small area caused by local poor reservoir quality. For the stable inter-bedded pattern, sandbody covers large horizontal area, sand layer and mud layer alternate in vertical. The sandbody possesses good connectivity in later and poor connectivity in vertical, some relative large area remaining oil exists resulting from poor reservoir quality. The sandbody of isolated thin-layer pattern distribute on outer front facies of various types of delta, because of its very small sandbody density, the connectivity between sandbodies is very poor in 3D space, remaining oil can be produced only by density well pattern.

**Key words** Songliao basin shallow water delta depositional characteristic subaqueous channel front facies framework model remaining oil