

doi:10.3799/dqkx.2012.00

松辽盆地新立地区浅水三角洲 水下分流河道砂体结构解剖

王家豪¹, 陈红汉¹, 江涛², 唐振兴², 赵宝峰¹, 徐东浩¹

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 中石油吉林油田分公司勘探开发研究院, 吉林松原 138000

摘要: 上白垩统嫩江组三段时期, 松辽盆地进入坳陷晚期演化阶段, 浅水三角洲广泛发育. 在新立地区, 与 III、II、I 3 个砂组对应, 嫩三段由 3 个浅湖—三角洲前缘的沉积旋回组成, 指示了湖盆水体逐渐变浅的过程. 基于研究区密井网资料, 通过对 3 个砂组沉积相平面展布和水下分流河道砂体结构解剖表明, 随着盆地坡度逐渐变缓和水体变浅, 三角洲规模迅速增大, 水下分流河道稳定性增强, 单支水道延伸距离增加, 分叉—合并频率降低, 决口—漫溢作用增强, 水下分支间湾面积比例增加, 由此导致水下分流河道砂体连通性依次减弱, 分别呈中厚席状、窄薄条带—斑块状、宽厚条带状, 并控制了油藏类型由构造型向岩性油藏的转变. 最终, 总结出网状、枝状、似曲流河 3 种浅水三角洲沉积模式.

关键词: 松辽盆地; 浅水三角洲; 水下分流河道; 岩性油藏; 石油地质.

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2012)03-0000-09

收稿日期: 2011-07-23

Sandbodies Frameworks of Subaqueous Distributary Channel in Shallow-Water Delta, Xinli Area of Songliao Basin

WANG Jia-hao¹, CHEN Hong-han¹, JIANG Tao², TANG Zhen-xing², ZHAO Bao-feng¹, XU Dong-hao¹

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Petroleum Exploration and Production Research Institute of Jilin Oil Company Branch, CNPC, Songyuan 138000, China

Abstract: The Songliao basin evolved into the late down-warping stage, and shallow-water deltas had extensively developed in the Third Member of Nenjiang Formation, upper Cretaceous. In the Third Member of the Xinli area, Three depositional cycles were identified to be evolved from shallow-lake subfacies to delta front subfacies respectively, indicating gradually shallowing lake. Accordingly, three Sand-units of III, II and I were divided from the bottom to top. Based on abundant data of dense wells, sedimentary facies maps and sandbodies structures of subaqueous distributary channel in each Sand-units were analyzed in detail, and a series of changes accompanied with basin flattening and shallowing gradually were summed up as follows: deltas farther extended; subaqueous distributary channels more stabilized; single channel farther elongated; channels less bifurcated and converged; crevasse splay occurred more frequently; subaqueous interdistributary bays distributed more extensively. Consequently subaqueous distributary channel sandbodies less connected with each other and can be described as moderately thick sheet-shaped, narrow-thin strap-shaped to speckle-shaped, and wide-thick strap-shaped respectively, which resulted in oil pools styles transforming from tectonic reservoirs to lithologic reservoirs. Finally, corresponding to the three Sand-units respectively, three depositional models were summarized to be reticular, ramiform and meandering river-like.

Key words: Songliao basin; shallow-water delta; subaqueous distributary channel; lithologic reservoirs; petroleum geology.

浅水三角洲在我国中—新生带克拉通坳陷盆地
分布十分广泛, 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组(邹才

能等, 2008)、渤海湾盆地新近系(朱伟林等, 2008)以及现代鄱阳湖盆地(邹才能等, 2008; 张昌民等,

2010)均发育了大型浅水三角洲,松辽盆地更是在下白垩统泉头组、上白垩统姚家组和嫩江组等多层位发育(楼章华等,1998,2004;吕晓光等,1999;韩晓东等,2000;王建功等,2007),为油气成藏提供了丰富的储层。作为一种特殊的三角洲类型,浅水三角洲以分流河道、水下分流河道沉积为主,特征上介于河道和经典的三角洲分流河道之间,其砂体呈条带状分布,易于形成岩性或构造—岩性油气藏类型。而且,受物源供给、湖底坡度、湖盆水体深浅和湖平面变化等因素的影响,(水下)分流河道数量、规模、分叉—合并频率(单位距离内水下分流河道分叉—合并的次数)不同(楼章华等,1998,2004;韩晓东等,2000),形成(横向)连通性和(垂向)连续性不同的的储层砂体。因此,开展(水下)分流河道砂体结构精细解剖,对油气分布规律的认识和开发方案的制定至关重要。

1 地质背景

研究区新立地区位于松辽盆地中央凹陷区的扶新隆起带,面积约 400 km²(图 1)。松辽盆地是中国东部中—新生代具有断—坳双重结构的大型复合型沉积盆地,自晚侏罗世以来经历了伸展断陷、坳陷、构造反转和新生代断坳等 4 个阶段,充填地层厚达万米以上。目的层段上白垩统嫩江组三段发育于盆地坳陷晚期,该时期基底沉降减弱,湖泊水体变浅,受北部物源供给,在盆地中部发育了广泛的浅水三角洲(赵志魁等,2009),研究区三角洲属其中的组成

部分。新立地区具备与深部丰富烃源岩沟通的断层通道、高幅度背斜圈闭和砂岩物性好等油气成藏的诸多优越条件,迄今已取得了大量勘探成果。研究区探井和开发井达 1 400 多口,密井网区井间距仅 150~300 m,为本文研究提供了详实的资料。在地层精细划分对比、岩芯观察、测井相分析的基础上,本文通过地震均方根振幅属性提取、小层砂体等厚图编制和钻井沉积相剖面分析,揭示了嫩三段自下而上 III、II、I 砂组浅水三角洲的沉积演化以及水下分流河道的砂体结构特点。

2 沉积微相类型及特征

结合岩芯观察与测井相(采用自然电位 SP、自然伽马 GR、视电阻率 R_{2.5} 和 R_{0.5} 曲线)分析,研究区嫩三段由灰—深灰色泥岩、砂质泥岩夹灰—灰白色粉—细砂岩组成,发育三角洲和湖泊两种沉积相,垂向上呈现三幕浅湖—三角洲前缘的前积充填序列,由此细分为 I、II、III 3 个砂组和 9 个小层。其中,前缘亚相包括远沙坝、河口坝、水下分流河道、水下分支间湾、漫溢、决口水道等微相类型(图 2)。

浅湖亚相:主要发育于各砂组下部的第 3 小层,由灰—深灰色泥岩组成,水平层理发育,含丰富的介形虫和少量双壳、螺化石。测井曲线低幅平直。

水下分流河道微相:包括点沙坝和天然堤 2 个组成部分,总体构成向上变细的正旋回序列。点沙坝沉积厚 2~3 m,最厚可达 10 m,由灰白色粉砂岩、细砂岩组成,底部突变或弱冲刷,下部含少量泥砾,之上发育板状—楔状交错层理,局部见槽状交错层理。天然堤发育于水下分流河道沉积的上部,由灰色、灰绿色泥质粉砂岩向上变细为粉砂质泥岩组成,厚度 80~200 cm,粉砂质泥岩中常夹泥质粉砂岩显示波状层理;泥质粉砂岩呈团块状或具不清晰的水平层理、波状交错层理。测井曲线包括高幅平滑箱型、高幅齿化箱型、钟形和圣诞树型等 4 种样式,反映了水下分流河道在不同部位、不同区段岩性组成上的差异。

水下分支间湾微相:分布于水下分流河道之间的低洼地带,主要由灰—灰绿色团块状泥岩、砂质泥岩组成,常见植物碎屑和少量叶片、根化石。测井曲线低幅平直,因夹薄层泥质粉砂岩而见少量细齿。水下分支间湾微相常见与浅湖亚相过渡,反映了湖平面的波动变化。

漫溢微相:位于水下分流河道天然堤的两侧,由

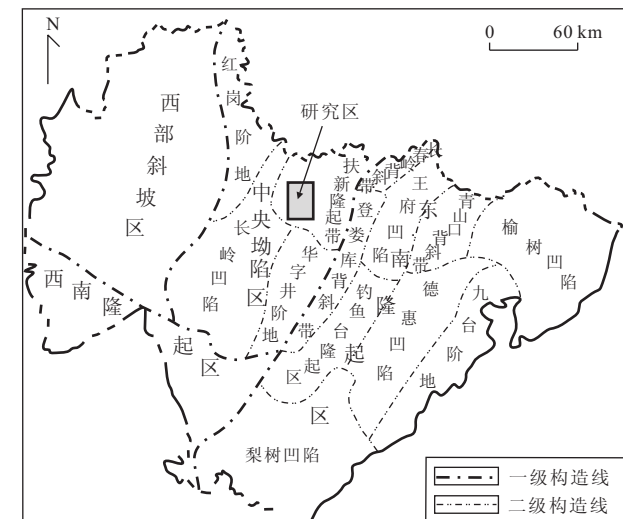


图 1 松辽盆地南部构造分区

Fig. 1 Tectonic units in the southern Songliao basin

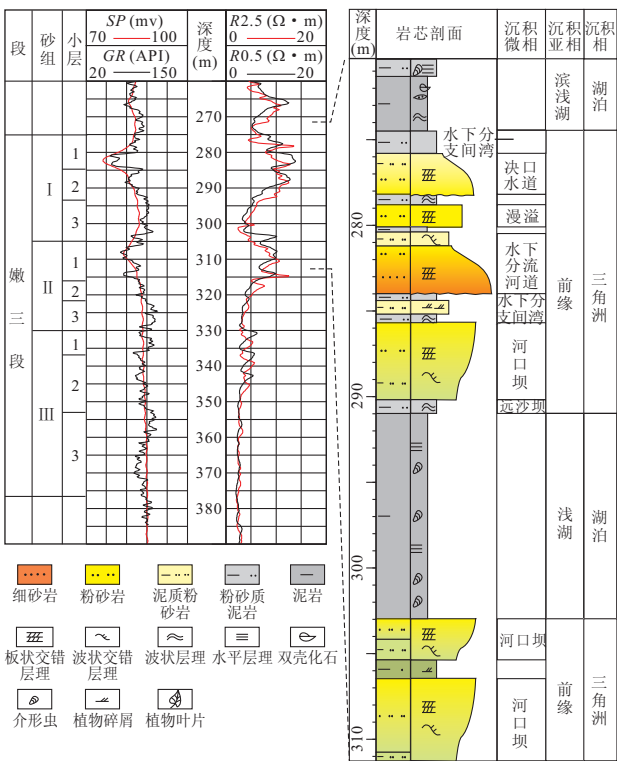


图 2 JH105 井嫩三段沉积演化序列(井位见图 3)
Fig. 2 Depositional sequence in the Third Member of Nenjiang Formation, well JH105

洪水期河水溢出天然堤沉积形成。常夹在水下分支间湾泥质沉积之间,由灰色泥质粉砂岩夹薄层泥岩组成,团块状或不清晰波状层理、波状交错层理,见较多植物茎和少量根化石。测井曲线呈低一中幅锯齿型、指型。

决口水道微相:在洪水期河水通过天然堤决口在水下分支间湾堆积形成。局部决口水道具 2~3 级分支形成朵状决口扇。相比水下分流河道,决口水道规模小,沉积物粒度细,砂体薄,由灰—灰白色粉砂岩、泥质粉砂岩构成正旋回,发育板状—波状交错层理,旋回底部突变、弱冲刷,厚度多在 1 m 左右,最厚可达 2 m。测井曲线呈低一中幅薄钟型或圣诞树型。

河口坝微相:形成于水下分流河道河口附近。由浅灰—灰白色泥质粉砂岩、粉砂岩组成,呈反旋回。泥质粉砂岩中普遍夹泥质纹层,波状层理发育;粉砂岩发育波状、板状交错层理。测井曲线呈中—高幅漏斗型。

远沙坝微相:分布于河口坝向盆地一侧的坝前地带,由灰—灰白色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩组成的反旋回序列,波状层理、透镜状层理发育。测井曲线呈低幅漏斗型。

总体上,研究区目的层段发育水下分流河道、决

口水道、漫溢、远沙坝、河口坝等砂体类型。其中,水下分流河道点沙坝砂体粒度粗,物性好,孔隙度 25%~35%,渗透率 $(100\sim500)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$,是研究区主力储层。其他类型粒度细,泥夹层多,物性较差,储集意义不大。

3 沉积相平面展布分析

沉积相平面展布分析采取地震均方根振幅属性与小层级别的砂岩等厚图、测井相标定相结合。尽管研究区钻井密集,但地震属性对物源供给方向、沉积相平面展布的总体格局有着重要指导价值。

3.1 均方根振幅属性

地震属性是目前各类水道展布研究的常用手段,包括重力流水道、河流、三角洲分流河道—水下分流河道等(曹卿荣等,2007;崔永谦等,2009;王建功等,2009),基于波阻抗差的振幅类属性对岩性变化敏感,是沉积相研究中普遍采用的属性类型(蒋恕等,2008)。研究区嫩三段埋深浅($<800\text{ m}$)、地层薄($80\sim110\text{ m}$)。经过合成记录标定,嫩三段在地震剖面上视厚约 90 ms,由三组正—负相位同相轴组成,III、II 和 I 砂组分别与一组同相轴对应,体现了地震反射与沉积旋回的良好对应关系,且全区地震反射较整一,未见前积、超覆等不协调现象,易于追踪。

抽提 3 个砂组的均方根振幅属性表明,三角洲砂体发育区与均方根振幅高值区(红黄色)对应。其中,III 砂组三角洲发育于研究区北部,呈南南西向延伸约 14 km,面积约 90 km^2 ,由向东南分支的 4 个次级朵体复合构成,其东南侧发育多个河口坝(图 3a)。II 砂组三角洲成叶片状,向南推进至研究区中部,延伸距离约 21 km,面积 165 km^2 ,水下分流河道数量多,对应于均方根振幅高值的窄细条带(图 3b)。I 砂组三角洲的范围已超出研究区,向南延伸距离 $>35\text{ km}$,由少量宽条带状水下分流河道及广泛的水下分支间湾组成,水下分流河道类似于曲流河,在中部交织成 4 个菱形;其两侧分布较多决口扇朵体;另外,该时期还存在东、西部水下分流河道的汇入(图 3c)。

3.2 砂体平面展布

III 砂组 2 小层、II 砂组 1 小层和 I 砂组 2 小层分别是 3 个砂组砂体主要发育层位,编制其砂体等厚图表明,密井网区砂体展布与均方根振幅属性高值区的位置、形态、规模等方面均吻合一致,主要为三角洲前缘水下分流河道、河口坝微相区;而均方根

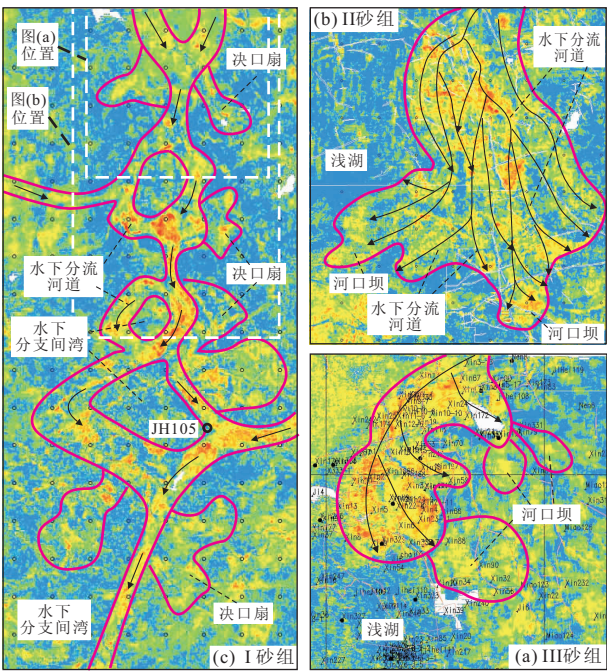


图 3 地震均方根振幅属性及其沉积相解释
Fig. 3 Sedimentary facies interpretation by RMS seismic attribute

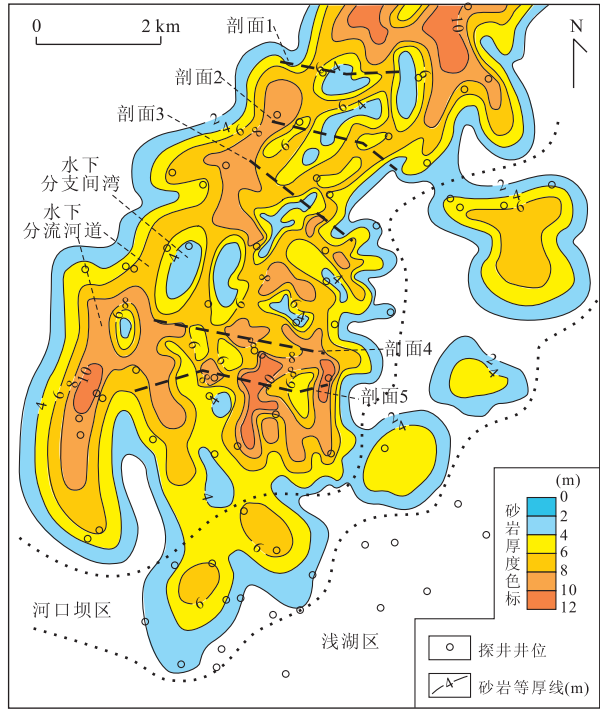


图 4 III 砂组 2 小层砂岩等厚图
fig. 4 Sandbodies isopach map in Layer 2 of sand-unit III

振幅的低值区主要对应于浅湖亚相、水下分支间湾微相。自下而上砂体展布特征如下：

(1)III 砂组 2 小层：砂体厚 2~12 m。其中，水下

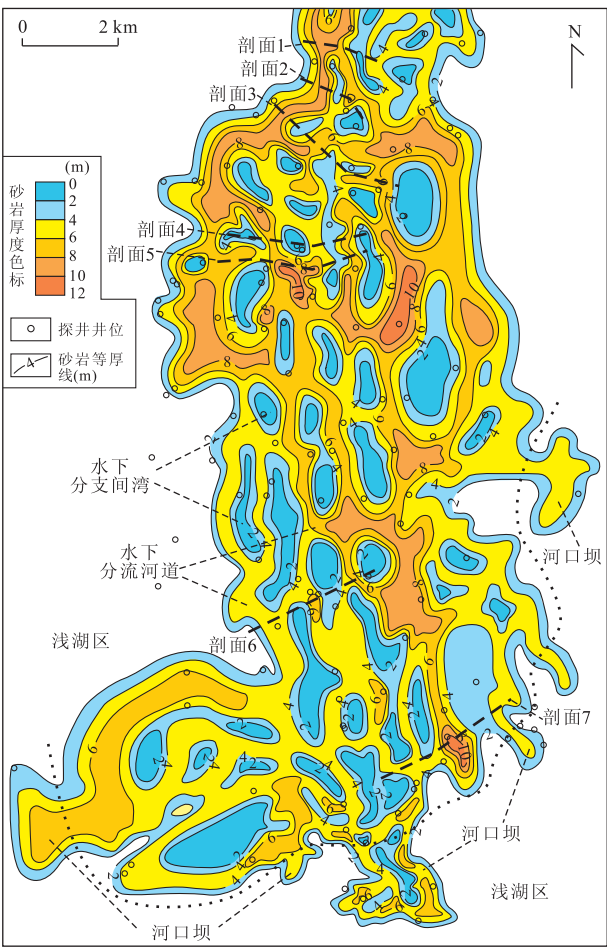


图 5 II 砂组 1 小层砂岩等厚图
Fig. 5 Sandbodies isopach map in Layer 1 of sand-unit II

分支间湾及分流河道侧翼砂岩厚度<4 m；水下分流河道砂体呈条带状，宽 500~800 m，厚 6~8 m，局部主水道砂体厚达 8~12 m；河口坝砂体呈椭圆状，分布于三角洲东南侧水下分流河道河口部位，砂体厚度 2~8 m。总体上，该小层三角洲水下分流河道分叉一合并频繁，单支水道延伸距离短，砂体大多连片分布；水下分支间湾面积小；河口坝较发育。

(2)II 砂组 1 小层：砂体厚 2~12 m。其中，水下分支间湾及分流河道侧翼砂体厚度<4 m。水下分流河道砂体宽约 600 m，局部达 1 000 m；厚度 4~10 m，局部厚达 12 m。河口坝砂体分布于三角洲南部水下分流河道河口部位，厚 4~6 m，局部达 8 m。与 III-2 小层相比，该时期三角洲呈长条状；水下分流河道近南北向延伸，单支水道延伸距离增加，分叉一合并频率降低；水下分流河道砂体总体向南减薄，彼此连通程度减弱，单支水道砂体呈窄长条带状，局部交汇呈斑块状；水下分支间湾单个及整体面积在三角洲中所占比例增加；河口坝发育程度降低。

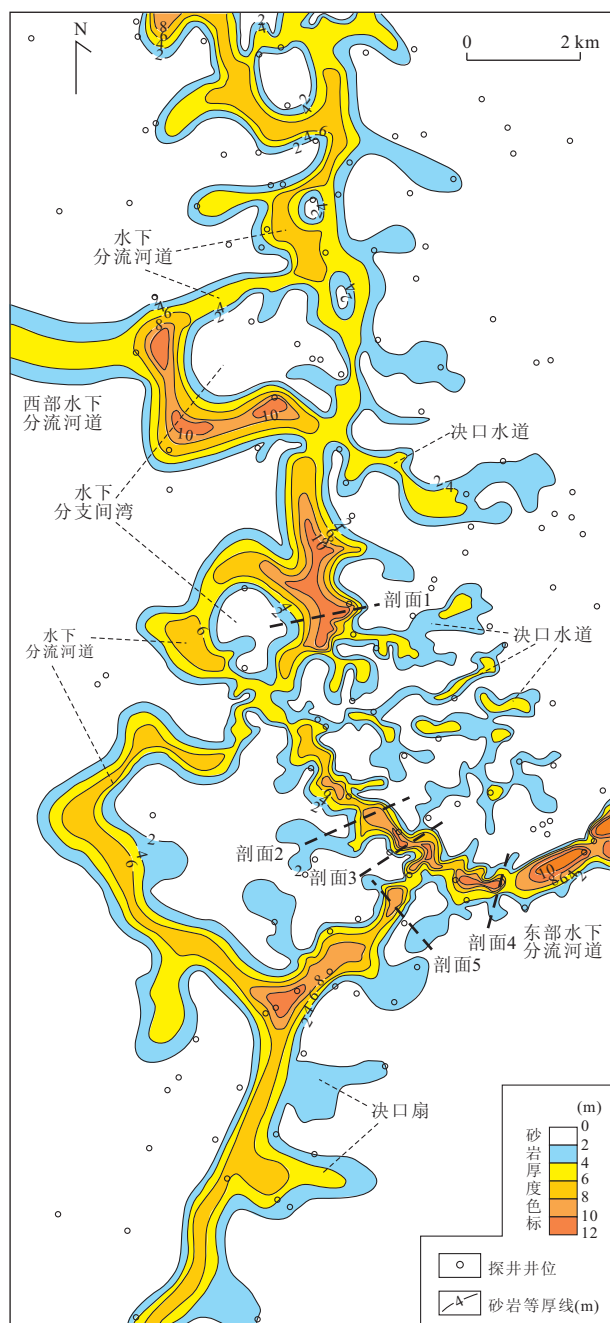


图6 I砂组2小层砂岩等厚图

Fig. 6 Sandbodies isopach map in Layer 2 of sand-unit I

4 水下分流河道砂体结构解剖

鉴于小层内部存在多期水下分流河道和其他微相砂体类型,在上述砂岩平面展布分析的基础上,本文充分应用研究区密井网资料条件,编制沉积相横向对比剖面,以进一步揭示水下分流河道的结构。水下分流河道单砂体的识别以测井相在横向或垂向上变化为依据。垂向上,两期叠置水下分流河道砂体之间常存在泥夹层造成的齿化,上覆砂体底部测井曲线存在高幅跳跃。横向上,单个水下分流河道砂体测井曲线向两侧幅度降低、减薄且齿化增加,曲线形态由箱型→钟形→圣诞树型的完整或不完整的变化,显示砂体向两侧减薄、粒度变细、天然堤发育和泥夹层增多的变化。

剖面揭示,水下分流河道砂体包括窄薄碟状、宽薄碟状、宽厚槽状、不对称透镜状等不同形状。连接方式包括孤立、水平搭接、错位叠置、垂向叠置、水平搭接—垂向叠置等连通性或连续性增强的序列(吕晓光等,1999;王家豪等,2004)(图7)。显然,孤立砂体易于形成岩性油气藏;垂向叠置导致垂向连续性增强,有利于规模性岩性油藏的发育;水平搭接、错位叠置导致连通—连续性增强,则有利于形成连片砂体和构造油藏。

(1) III 砂组。依据由北向南的5条横剖面(图7),水下分流河道砂体结构特征如下:(a)单砂体测井相:普遍为中高幅钟型,个别为高幅箱型。(b)单砂体形态:以宽—中厚碟状为主。经统计,砂体宽度与厚度正相关,厚度以4~6 m为主,占48%;其次为6~8 m,占41%。宽度分布在400~1 000 m之间,其中,400~600 m占33%,600~800 m占41%,800~1 000 m占22%。最终,砂体平均宽683 m,厚5.7 m,宽/厚比123.5。(c)连通—连续性:砂体集中分布在2小层,普遍为水平搭接,少量错位叠置和垂向叠置,连通性好,总体呈中厚席状。

(2) II 砂组。由北向南编制7条剖面(图8),揭示水下分流河道砂体特征如下:(a)单砂体测井相:中高幅钟形为主,少量高幅箱型、圣诞树型。(b)单砂体形态:普遍较薄,窄薄碟状和不对称透镜状为主,少量呈宽厚槽状。经统计,砂体宽度与厚度正相关。厚度以2~4 m为主,占66%;其次为4~6 m,占24%。宽度分布在200~800 m之间,200~400 m占24%,400~600 m占53%,600~800 m占21%。最终,砂体平均宽510 m,厚3.5 m,宽/厚比157.7。(c)

(3) I 砂组 2 小层:砂体厚2~12 m。水下分支间湾及分流河道侧翼砂体厚度<4 m。水下分流河道砂体宽400~750 m,厚度6~8 m,局部富集部位达12 m;水下分流河道两侧决口水道、漫溢砂体厚2~4 m。总体上,该时期水下分流河道数量少,单支水道延伸距离远,侧向迁移及决口—漫溢作用增强,砂体呈宽条带状,在研究区中部少量分叉—合并呈4个菱形;水下分支间湾分布广泛;河口坝不发育。

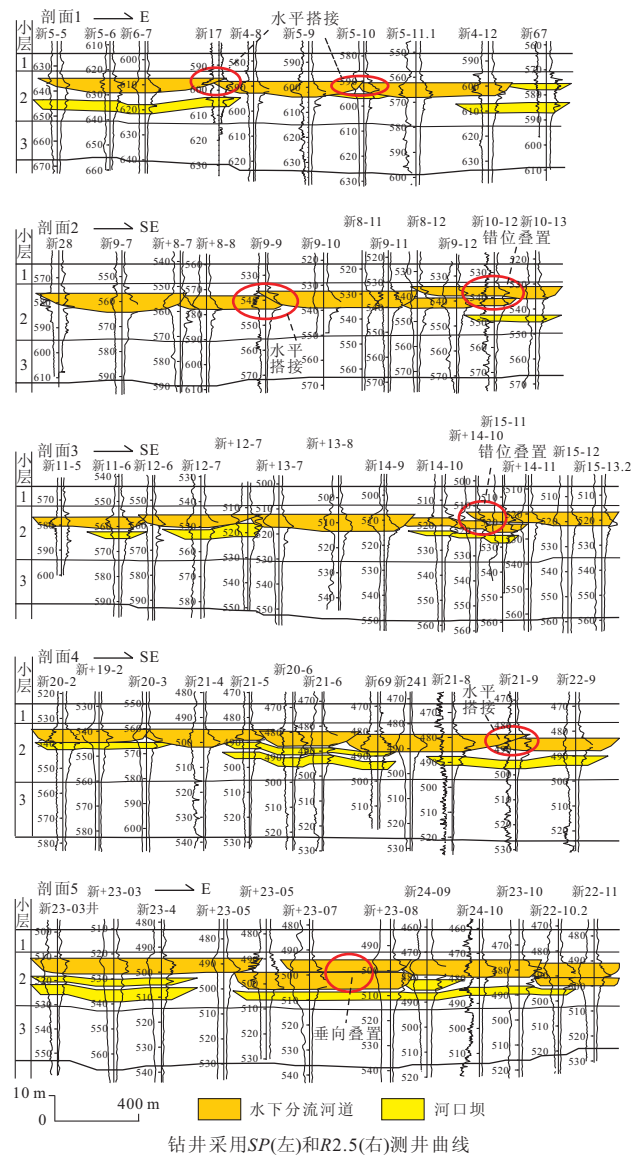


图 7 III 砂组三角洲砂体结构解剖(剖面位置见图 4)

Fig. 7 Profiles showing sandbodies structures in sand-unit III

垂直方向为井深,单位:m

连通—连续性:砂体数量多,但分布较分散,在 3 个小层均有发育,以 1 小层为主.连接方式以孤立、水平搭接为主,局部见 2—3 期垂向或错位叠置,但夹层较稳定,连通性相比 III 砂组 2 小层明显较差.另外,连通性存在由北向南的交替变化,其中剖面 1、2、4、6 砂体规模小,较孤立;剖面 3、5、7 砂体规模相对大,连通性较好.与平面图对照不难发现,连通砂体分布在水道交汇部位.

(3)I 砂组.在该砂组编制 5 条剖面(图 9),揭示水下分流河道砂体特征如下:(a)单砂体测井相:高幅厚箱型为主,其次为中幅钟形,少量圣诞树型.

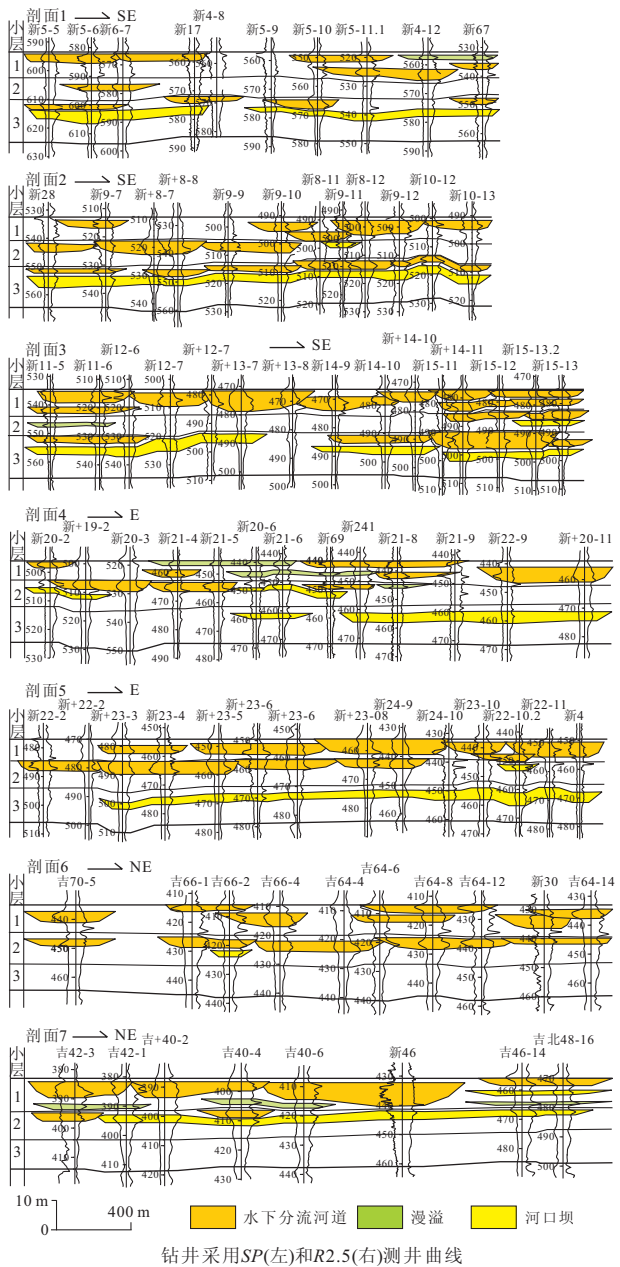


图 8 嫩三段 II 砂组砂体结构解剖(剖面位置见图 5)

Fig. 8 Profiles showing sandbodies structures in sand-unit II

垂直方向为井深,单位:m

(b)单砂体形状:砂体规模大,多呈宽—厚槽状,少量宽—中厚碟状.统计表明,砂体宽度与厚度正相关.单砂体厚度以 6~8 m 为主,占 53%;其次为 8~10 m,占 24%.宽度主要分布在 400~1 200 m 之间,400~600 m 占 24%,600~800 m 占 18%,800~1 000 m 占 47%,1 000~1 200 m 占 12%.最终,水下分流河道砂体平均宽 795 m、厚 7.7 m、宽/厚比 110.1.(c)砂体连通—连续性:单砂体数量少,垂向叠置为主,局部见水平搭接和错位叠置,砂体总体呈孤立的宽厚条带状.

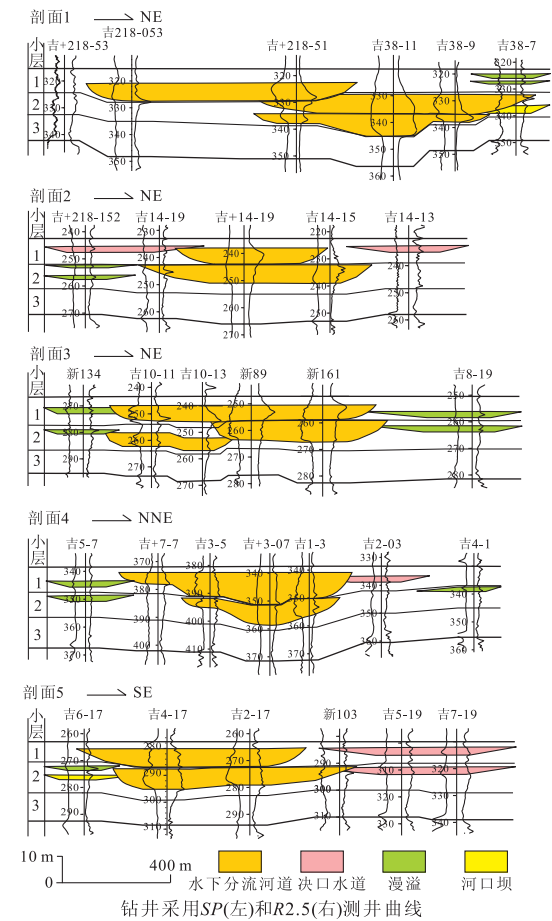


图 9 I 砂组砂体结构解剖(剖面位置见图 6)

Fig. 9 Profiles showing sandbodies structures in sand-unit I

5 沉积相及砂体结构演化分析

受物源供给、湖底坡度、湖盆水体深浅和湖平面变化等因素的影响,浅水三角洲的平面展布及微相构成发生相应变化(韩晓东等,2000;楼章华等,2004)。经典的三角洲前缘,以远沙坝—河口坝发育为主(吴景富等,2010)。随着水体变浅和浅水三角洲的发育,水下分流河道成为主要微相类型。因此,三角洲前缘远沙坝—河口坝发育程度是湖盆坡度和水体深浅的指标。研究区受远程稳定物源供给,嫩三段发育于湖盆拗陷萎缩期,基底沉降逐渐减弱,自下而上 III、II、I 3 个砂组的沉积特点反映了湖盆坡度逐渐变缓、水体逐渐变浅、三角洲向南渐次进积的演化序列。

(1)III 砂组时期,厚层浅湖相暗色泥岩发育,三角洲初步导入,其面积小;水下分流河道延伸距离短,分叉—合并频繁,交织呈网状,之间水下分支间湾面积小;远沙坝—河口坝较发育。反映湖盆坡度较

大、水体较深。水下分流河道砂体连通性好,总体呈中厚席状展布。

(2)II 砂组时期,三角洲迅速扩展,呈伸长状;水下分流河道延伸距离远,分叉—合并频率降低;水下分支间湾面积增加,呈长条状;远沙坝—河口坝沉积减少。反映湖盆坡度变缓,水体变浅。砂体包括两种类型:较孤立的窄细条带状砂体、在水下分流河道分叉—合并部位连通性较好的中厚斑块状砂体。

(3)I 砂组时期,三角洲范围进一步扩张,呈极度伸长状;水下分流河道数量少,规模增大,弯曲度高,稳定性进一步增强,延伸距离倍增,少量分叉—合并,决口—漫溢频繁,类似于曲流河(于兴河和李胜利,2009);水下分支间湾占据三角洲的广大部分;河口坝零星发育,垂向上常见水下分流河道沉积直接覆盖在浅湖相沉积之上,即“跳相”特点,反映盆地水体进一步变浅,坡度进一步变缓以致平坦无变化。砂体主要为孤立宽厚条带状砂体。

总之,随着湖盆坡度变缓、水体变浅,三角洲迅速推进和伸长,水下分流河道的建设性增强,分叉—合并频率降低,由此造成砂体连通性变差。依据目的层段 III、II、I 三个砂组沉积相平面展布、微相组成和水下分流河道的结构样式,归结为网状、枝状、似曲流河 3 种沉积模式(韩晓东等,2000;冯志强等,2006)(图 10)。

6 结论及意义

松辽盆地新立地区嫩三段发育浅水三角洲类型,自下而上 III、II、I 三个砂组三角洲总体呈现规模迅速增大、水下分流河道稳定性增强、单支水道延伸距离增加、分叉—合并频率减小、决口—漫溢作用增强的演化序列,反映了湖盆坡度逐渐变缓和水体变浅的过程,由此归结为网状、枝状、似曲流河 3 种浅水三角洲沉积模式。

研究区 III、II、I 三个砂组三角洲的演化决定了水下分流河道砂体连通性渐次变差,在实际勘探中已得到了证实。其中,III 砂组砂体主要由粉砂岩组成,连通性好,呈中厚席状展布,受东西向和南北向两组断层切割,每个断块内存在油水界面,为典型的断块油藏,虽然三角洲面积小,但勘探成果丰富。II 砂组单砂体数量多,但砂体粒度细,由粉砂岩和泥质粉砂岩组成,以孤立砂体为主,局部连通,小型构造油气藏和岩性油气藏共存,勘探效果不佳。I 砂组水下分流河道数量少,但规模大,砂体粒度粗,主要为

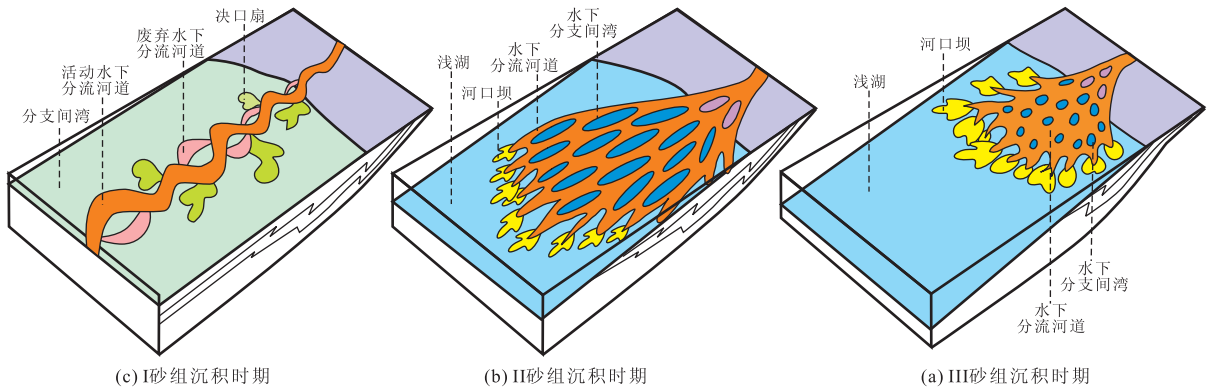


图 10 嫩三段各砂组沉积模式

Fig. 10 Sedimentary models in the each Sand-unit, Third Member of Nenjiang Formation

细砂岩,呈宽厚条带状展布,最终控制了断背斜背景下岩性油气藏的形成。

References

- Cao, Q. R., Li, P., Sun, K., et al., 2007. Using seismic attributes to identify channel sand body. *Lithologic Reservoirs*, 19(2): 93—96 (in Chinese with English abstract).
- Cui, Y. Q., Qin, F. Q., Lu, Y. H., et al., 2009. Research and application of detailed seismic prediction in fluvial reservoirs—an example from the palaeogene channel sand in the Jizhong depression, the Bohai bay basin. *Oil & Gas Geology*, 30(5): 668—672 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Z. Q., Zhang, S., Xie, X. N., et al., 2006. Discovery of a large-scale lacustrine subaqueous channel in the Nenjiang Formation of the Songliao basin and its implication on petroleum geology. *Acta Geologica Sinica*, 80(8): 1226—1232 (in Chinese with English abstract).
- Han, X. D., Lou, Z. H., Yao, Y. M., et al., 2000. Analysis of the sedimentary dynamic process of the shallow-water lake delta in the Songliao basin, northeastern China. *Acta Mineralgica Sinica*, 20(3): 305—313 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S., Wang, H., Weimer, P., 2008. Sequence stratigraphy characteristics and sedimentary elements in deep-water. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 825—833 (in Chinese with English abstract).
- Lou, Z. H., Lu, Q. M., Cai, X. Y., et al., 1998. Influence of lake level fluctuation on sandbody shapes at shallow-water delta front. *Acta Sedimentologica Sinica*, 16(4): 27—31 (in Chinese with English abstract).
- Lou, Z. H., Yuan, D., Jin, A. M., 2004. Types, characteristics of sandbodies in shallow-water deltafront and sedimentary models in Northern Songliao basin, China. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 31(2): 211—215 (in Chinese with English abstract).
- Lü, X. G., Li, C. S., Cai, X. Y., et al., 1999. Depositional characteristics and front facies reservoir framework model in Songliao shallow lacustrine delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 17(4): 572—577 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. G., Wang, T. Q., Wei, P. S., et al., 2007. Sedimentary mode of shallow lacustrine delta of large continental basin — an example from Putaohua Formation in northern Songliao basin. *Lithologic Reservoirs*, 19(2): 28—34 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. G., Wang, T. Q., Zhang, S., et al., 2009. Sedimentary characteristics and geophysical response of sub-lacustrine fan during transgress period in Songliao basin. *Acta Petrolei. Sinica*, 30(3): 361—366 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. H., Yao, G. Q., Zhao, Y. C., 2004. Study on identification of short-term base-level cycle and macroscopic distribution of reservoirs in shallow-water braided delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(1): 87—94 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J. F., Xu, Q., Zhu, Y. H., 2010. Generation and evolution of the shelf-edge delta in Oligocene and Miocene of Baiyun sag in the South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(4): 681—690 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X. H., Li, S. L., 2009. The development and hotspot problems of clastic petroleum reservoir sedimentology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 880—895 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C. M., Yin, T. J., Zhu, Y. J., et al., 2010. Shallow-water deltas and models. *Acta Sedimentologica Sinica*,

- 28(5):933—944 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. K., Zhang, J. L., Zhao, Z. Y., et al., 2009. Reservoir sedimentology in southern Songliao basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Zhu, W. L., Li, J. P., Zhou, X. H., et al., 2008. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai bay, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(4): 575—582 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhao, W. Z., Zhang, X. Y., et al., 2008. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 813—825 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 曹卿荣, 李佩, 孙凯, 等, 2007. 应用地震属性分析技术刻画河道砂体. 岩性油气藏, 19(2): 93—96.
- 崔永谦, 秦凤启, 卢永和, 等, 2009. 河流相沉积储层地震精细预测方法研究与应用——以渤海湾盆地冀中坳陷古近系河道砂为例. 石油与天然气地质, 30(5): 668—672.
- 冯志强, 张顺, 解习农, 等, 2006. 松辽盆地嫩江组大型陆相坳陷湖盆湖底水道的发现及其石油地质意义. 地质学报, 80(8): 1226—1232.
- 韩晓东, 楼章华, 姚炎明, 等, 2000. 松辽盆地湖泊浅水三角洲沉积动力学研究. 矿物学报, 20(3): 305—313.
- 蒋恕, 王华, Weimer, P., 2008. 深水沉积层序特点及构成要素. 地球科学——中国地质大学学报, 33(6): 825—833.
- 楼章华, 卢庆梅, 蔡希源, 等, 1998. 湖平面升降对浅水三角洲前缘砂体形态的影响. 沉积学报, 16(4): 27—31.
- 楼章华, 袁笛, 金爱民, 2004. 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. 浙江大学学报(理学版), 31(2): 211—215.
- 吕晓光, 李长山, 蔡希源, 等, 1999. 辽大型浅水湖盆三角洲沉积特征及前缘相储层结构模型. 沉积学报, 17(4): 572—577.
- 王家豪, 姚光庆, 赵彦超, 2004. 浅水辫状河三角洲发育区短期基准面旋回划分及储层宏观特征分析. 沉积学报, 22(1): 87—94.
- 王建功, 王天琦, 卫平生, 等, 2007. 大型坳陷湖盆浅水三角洲沉积模式——以松辽盆地北部葡萄花油层为例. 岩性油气藏, 19(2): 28—34.
- 王建功, 王天琦, 张顺, 等, 2009. 松辽坳陷盆地水侵期湖底扇沉积特征及地球物理响应. 石油学报, 30(3): 361—366.
- 吴景富, 徐强, 祝彦贺, 2010. 南海白云凹陷深水区渐新世—中新世陆架边缘三角洲形成及演化. 地球科学——中国地质大学学报, 35(4): 681—690.
- 于兴河, 李胜利, 2009. 碎屑岩系油气储层沉积学的发展历程与热点问题思考. 沉积学报, 27(5): 880—895.
- 张昌民, 尹太举, 朱永进, 等, 2010. 浅水三角洲沉积模式. 沉积学报, 28(5): 933—944.
- 赵志魁, 张金亮, 赵占银, 等, 2009. 松辽盆地南部坳陷湖盆沉积相和储层研究. 北京: 石油工业出版社.
- 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等, 2008. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探. 沉积学报, 26(4): 575—582.
- 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等, 2008. 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. 地质学报, 82(6): 813—825.