

退积型浅水三角洲沉积演化特征及砂体展布规律 ——以松辽盆地北部临江地区下白垩统泉头组四段为例

蔡全升^{1,2}, 胡明毅^{1,2}, 胡忠贵^{1,2}, 杨静静¹, 岳鑫³, 邱小松⁴

(1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100;

3. 中国石油 青海油田分公司 采油一厂, 青海 茫崖 816400; 4. 中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要:浅水三角洲沉积砂体已经成为现今油气勘探的重点对象,进一步深化浅水三角洲沉积特征及砂体展布规律研究,对于加快该类砂岩储层的油气勘探具有重要意义。为此,以松辽盆地北部临江地区下白垩统泉头组四段为研究对象,在总结前人研究成果的基础上,结合岩心、录井、测井以及地震资料,对湖盆扩张期退积型浅水三角洲沉积特征及砂体展布规律进行了深入研究。研究认为:退积型浅水三角洲沉积水体具有波动式上升的特征,沉积物粒度随着水体的加深逐渐变细,泥岩颜色自下至上逐渐由氧化色向还原色过渡,受水体短期波动影响,紫红色或灰绿色泥岩常交替出现。退积型浅水三角洲沉积环境仍然以三角洲平原和前缘沉积为主,随着沉积水体的加深,沉积相边界迅速向陆地迁移,但实际上在沉积演化过程中通常还存在着多次短期的湖平面升降和相带边界的双向迁移,从而使得在远离湖岸的区域出现河道沉积。河道沉积砂体是退积型浅水三角洲砂体的主要构成部分,在湖平面上升过程中河道砂体发育规模逐渐减弱,表现为纵向上连续沉积砂岩厚度逐渐变薄,并且河道砂体末端在湖浪作用下常呈现席状砂化。平面上由陆向湖河道砂体发育期次逐渐减少,湖平面大规模上升之前的三角洲平原和近岸三角洲前缘区域沉积砂体最为发育,是岩性油气藏勘探的有利目标区。

关键词:退积;浅水三角洲;砂体展布;泉四段;临江地区;松辽盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sedimentary evolution and distribution of sand bodies of retrogradational shallow-water delta: A case study from 4th member of the Cretaceous Quantou Formation in the Lingjiang area, Songliao Basin

Cai Quansheng^{1,2}, Hu Mingyi^{1,2}, Hu Zhonggui^{1,2}, Yang Jingjing¹, Yue Xin³, Qiu Xiaosong⁴

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil-Gas Resource of Ministry of Education, Yangtze University,

Wuhan, Hubei 430100, China; 2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

3. First Oil Production Plant of Qinghai Oilfield, PetroChina, Mangya, Qinghai 816400, China;

4. Langfang Branch of PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: Sedimentary sand bodies of shallow-water delta has become one of the main target areas of the current exploration. Thus a further study on sedimentary evolution and distribution of sand bodies of shallow-water delta should be of great importance for exploration. The 4th member of Cretaceous Quantou Formation in Linjiang area provides an interesting example to study sedimentary evolution and distribution of sand bodies of shallow-water delta during the stage of lake transgression in detail. The work is based both on previous research and on a combination of cores, well logging and seismic data. The results show that delta plain and delta front are still the main component of retrogradational shallow-water delta, whose sediment grain size becomes gradually finer upwards, and the color of mudstone component shifts from aubergine to celadon controlled by short-term fluctuation of sedimentary water. With rise of lake water level, sedimentary facies boundaries moved quickly towards land. However, this movement is superimposed by multiple shorter-term fluctuations of lake level and bi-directional migration of facies boundary, and the channel sandstones can form quite some distance away from lake shore. As the main type of sand bodies of retrogradational shallow-water delta, the size of channel sandstone reduced gradually during lake transgression, showing increasing thinning of sand thickness upwards. The channels terminate

收稿日期:2015-10-21; 修订日期:2016-07-15。

第一作者简介:蔡全升(1988—),男,博士研究生,地震沉积学与层序地层学。E-mail:cqsh0713@163.com。

通讯作者简介:胡明毅(1965—),男,教授、博士生导师,沉积学与层序地层学。E-mail:humingyi65@163.com。

基金项目:国家油气重大科技专项(2011ZX05007-002-001)。

as distributary sheet sands, reformed by infra-littoral wave. On the plane view, the cycles of channel development become fewer from proximal to distal. Channel sandstone of delta plain and nearshore delta front, which mainly developed before large-scale lake transgression, is favorable targets for oil-gas exploration.

Key words: retrogradation, shallow-water delta, distribution of sand bodies, 4th member of Quantou Formation, Linjiang area, Songliao Basin

Fisk 在 1954 年研究美国密西西比河现代三角洲沉积时首次提出了浅水三角洲的概念,认为浅水环境下形成的三角洲不具有 Gilbert 式顶积层、前积层和底积层三褶结构,该类型三角洲属于典型的高建设性河控三角洲^[1]。Postma 等学者^[2-3]进一步研究发现,水体深度是控制浅水三角洲发育的一个重要因素,低能盆地中水深在数十米以下发育的三角洲可统称为浅水三角洲。随后,许多国外学者从成因动力学、沉积微相特征以及浅水三角洲内部构成等方面展开了深入研究,均指出浅水三角洲多发育于水体较浅、地势平缓、构造相对稳定的陆表海或盆地缓坡环境,通常具有河道延伸远、频繁分叉改道和不发育河口坝沉积等特征。

国内学者自 20 世纪 80 年代以来也对我国陆相湖盆浅水三角洲沉积做了大量研究工作,并取得了一系列成果认识。赵翰卿等^[4]认为浅水三角洲单砂体具有厚度薄、分布广的特点;姚光庆等^[5]认为浅水三角洲相带分异明显,以三角洲平原为主,河口坝微相不发育;楼章华^[6]认为湖平面波动的频率及幅度控制浅水三角洲的沉积形态,湖面高幅高频整体快速下降易形成席状浅水三角洲,湖面稳定且中频中幅波动易形成朵状浅水三角洲,湖面低频低幅缓慢上升易形成枝状浅水三角洲;赵伟等^[7]在研究东营凹陷时认为断陷湖盆在萎缩期同样可以发育大型浅水三角洲沉积,且在构造运动的作用下,三角洲的发育具有明显的阶段性;王立武^[8]对松辽盆地南部姚家组一段沉积环境进行研究认为浅水三角洲不发育河口坝,三角洲前缘河道砂体普遍席状砂化,不具备三层式沉积结构和向上变粗的反沉积序列;纪友亮^[9]通过研究苏北盆地高邮凹陷认为浅水三角洲沉积砂体在波浪的作用可以形成沿湖岸线分布的滩坝砂体沉积;朱筱敏等^[10-12]通过对鄂尔多斯及松辽盆地浅水三角洲的研究,系统论述了拗陷型盆地辫状河和曲流河浅水三角洲的形成条件、沉积特征以及模式。总体来说,目前国内学者的研究多集中于浅水三角洲形成的有利地质背景、水动力学特征、沉积微相类型、平面展布形态及沉积模式等方面^[13-16],而对单一水体变化趋势的浅水三角洲沉积砂体的发育特征及展布规律研究相对较少,但随着国内岩性油气藏勘探的进一步深入,浅水三角洲“找砂”已经成为地质工作者的研究重点。

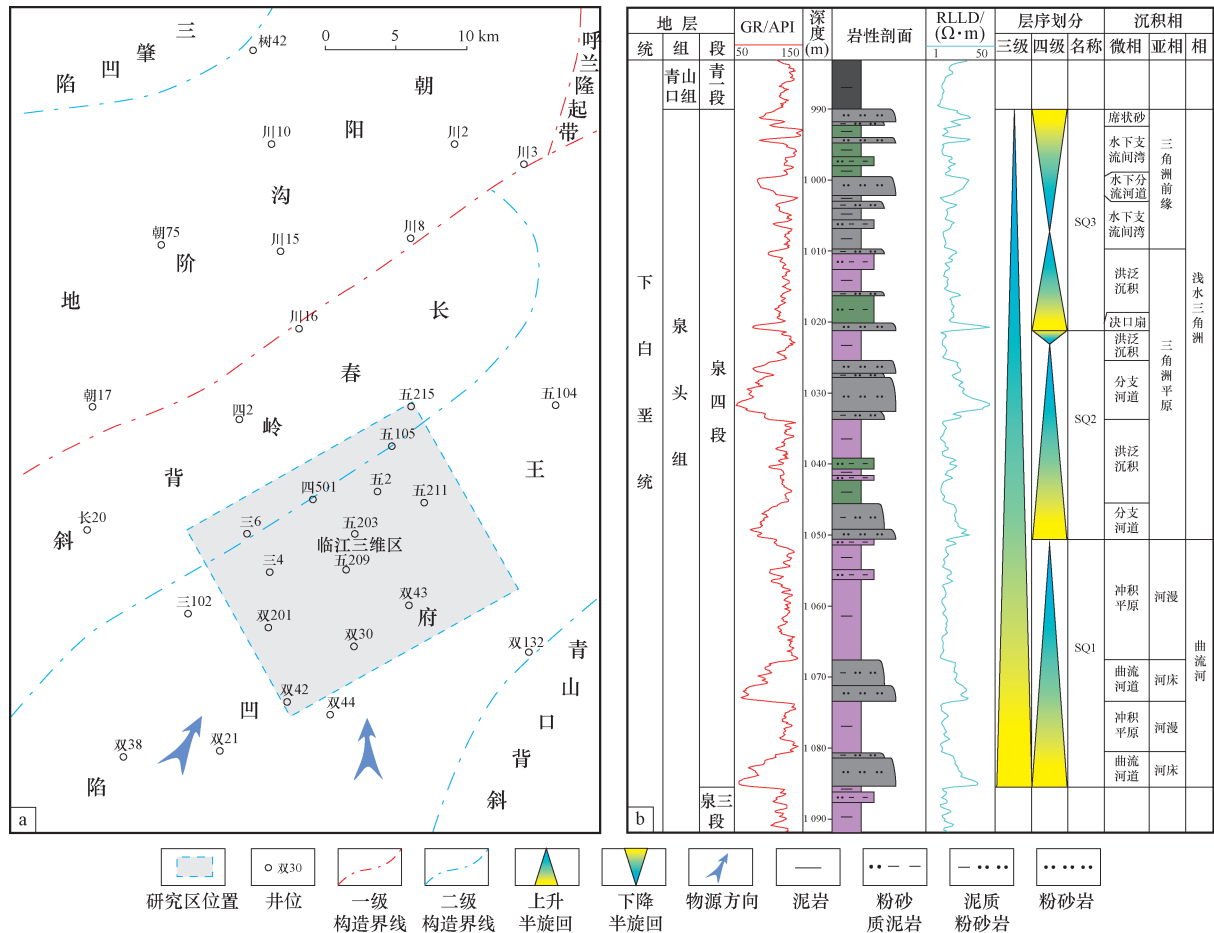
松辽盆地地下白垩统泉头组扶余油层发育典型的湖

盆浅水三角洲沉积^[10,17],其沉积砂体已经成为该区油气勘探的重点目标。进一步深入认识浅水三角洲沉积特征、砂体展布规律及其地震响应,对于加快我国东部大型湖盆浅水三角洲的油气勘探具有重要意义。因此,本文以沉积学、层序地层学以及地震沉积学理论为指导,以松辽盆地北部临江三维区为目标区,通过对研究区及其周缘 30 口取心井岩心的精细观察及 669 口单井沉积特征分析,结合三维地震资料等综合研究,分析了该区下白垩统泉头组四段湖盆扩张期退积型浅水三角洲的沉积特征,探讨了退积型浅水三角洲砂体在平面上及纵向上的发育规律,以期为加快该类沉积储层的油气勘探提供地质参考依据。

1 区域地质背景

松辽盆地是我国东部具有断-拗双重结构的大型中-新生代含油气盆地,总面积逾 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。沉积地层厚度达 11 000 m,白垩系为其主要沉积盖层,平均厚度大于 7 000 m,自下而上依次为沙河子组、营城组、登娄库组、泉头组(由下至上分别为泉一段、泉二段、泉三段和泉四段)、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组以及明水组,先后经历了断陷(J_3-K_1)、拗陷(K_1-K_2)和萎缩褶皱(K_2-Q)3 个阶段。

研究区(临江三维区)位于松辽盆地东南隆起带北部王府凹陷,毗邻中央凹陷一级构造单元,面积约 300 km^2 (图 1)。前人研究表明,泉头组四段沉积时期,整个松辽盆地处于稳定下拗阶段,湖盆范围逐渐扩大,王府凹陷与三肇凹陷此时连为一体,同属于大庆长垣以东地区的沉积中心^[18]。该时期,受盆地整体下拗活动影响,沉积中心基底地形平缓且水体较浅^[19]。研究区在南部物源的控制下,总体上发育了一套拗陷湖盆退积型浅水三角洲沉积序列。根据岩性、测井响应以及沉积旋回特征,泉四段纵向上表现为一个三级层序基准面上半旋回(图 1),层序底界面以区域发育的古土壤层以及多期河道冲刷面为特征,顶界面以青山口组黑色油页岩为标志,内部细分为 3 个四级层序,分别为 SQ1, SQ2, SQ3。随着盆地水体的持续上升,整个泉四段泥岩沉积物颜色逐渐由紫红色过渡到灰绿色,沉积相纵向上由曲流河或三角洲平原向三角洲前缘演化,沉积物粒度逐渐变细,整体上以发育正旋回沉



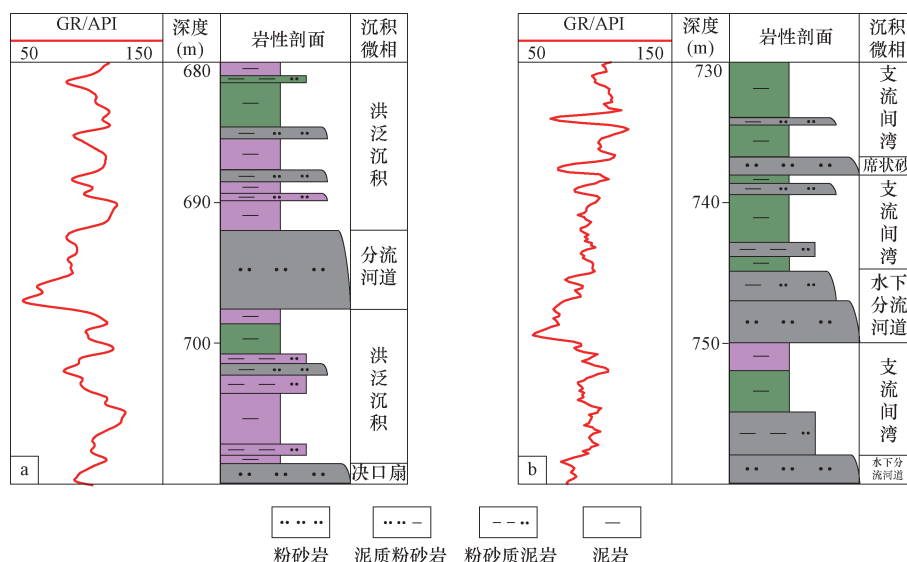


图2 松辽盆地临江地区泉四段退积型浅水三角洲沉积序列

Fig. 2 Sedimentary sequence of retrogradational shallow-water delta of the 4th member of the Quantou Formation in Linjiang area, the Songliao Basin

a. 三角洲平原沉积序列, 三5井; b. 三角洲前缘沉积序列, 五204井

且粒度细,在研究区以灰色-灰绿色粉砂岩为主(图3d,f,h)。砂体底部冲刷强度明显小于三角洲平原,且河道叠加期次减少。支流间湾岩性主要为灰色或灰绿色泥岩和粉砂质泥岩,偶夹薄层粉砂岩或紫红色泥岩,粉砂质泥岩中可见水平层理、波状层理、沙纹层理和生物扰动构造以及少量黄铁矿(图3i,l),说明工区内水体较安静但又受到了洪水或波浪袭扰。席状砂在浅水三角洲中通常被认为不发育,但实际上在退积型浅水三角洲中,随着水体的加深和波浪作用加强,这种微相类型是存在的且具有一定的发育规模,在单井上常可见到测井曲线为指状的薄层砂体。岩性以灰色或灰绿色粉砂岩为主,其顶底多为暗色泥岩,它们通常是河道席状砂化的结果(图2b)。在湖岸附近由于河流沉积作用较强,该微相多发育于离湖岸相对较远的河道侧缘或河道终结区外缘。

2.2 沉积构造特征

通过对研究区取心段岩心精细观察与描述,泉四段常见的原生沉积构造主要有冲刷侵蚀面构造、平行层理、交错层理、流水沙纹层理、波状层理、水平层理、生物扰动构造以及化学成因构造等,这些典型的沉积构造及组合特征对于解释工区内泉四段沉积环境具有重要作用。

冲刷面侵蚀面构造通常反映水动力条件较强的河道沉积环境,其界面之上常发育平行于冲刷面的泥砾层,多表示新一期河道沉积的开始(图3a-c)。交错层理和平行层理在水下和水上分支河道中都比

较常见,多与冲刷面构造或泥砾层相伴生,也是指示河道沉积的标志之一。如果泥砾或纹层间细粒沉积物为紫红色,可确定为水上分支河道沉积(图3a-c,图3e),而如果砂岩中的细粒沉积物或者泥砾为灰绿色或深灰色,则应属于水下分支河道沉积(图3d,图3f)。沙纹层理在研究区非常普遍,可见于河道间的单砂层或河道砂体顶部(图3g,h),为河流和波浪共同改造的结果。波状层理及水平层理在粉砂质泥岩或泥质粉砂岩中较常见,为弱水动力条件下形成的沉积构造(图3i),在洪泛沉积及支流间湾中较为发育。生物钻孔按照产出形态可分为平行层面和垂直层面两类(图3j),两者同时存在说明当时沉积水体氧气供给忽强忽弱,沉积水体忽深忽浅,为间歇性动荡环境。此外,在该区还可见到一些化学成因构造,如钙质结核及黄铁矿晶体等(图3k,l),其中钙质结核不仅出现在紫红色泥岩中,也可以出现在灰绿色泥岩,这表明研究区沉积水体具有整体偏浅的特征。

2.3 岩性粒度特征

由于研究区泉四段沉积时期离物源区相对较远,该段沉积物粒度总体较细,主要为细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩或泥岩。根据取心段砂体粒径资料统计分析发现:三角洲平原分支河道砂岩粒径主要分布区间为0.25~0.05 mm,粒度累计曲线呈两段式,跳跃总体较为发育,其含量占70%左右,细截点粒径 Φ 值约为3;随着河流向湖泊挺进,曲线中跳跃总体逐渐减少,悬浮总体逐渐增多,表现为三角洲前缘水下

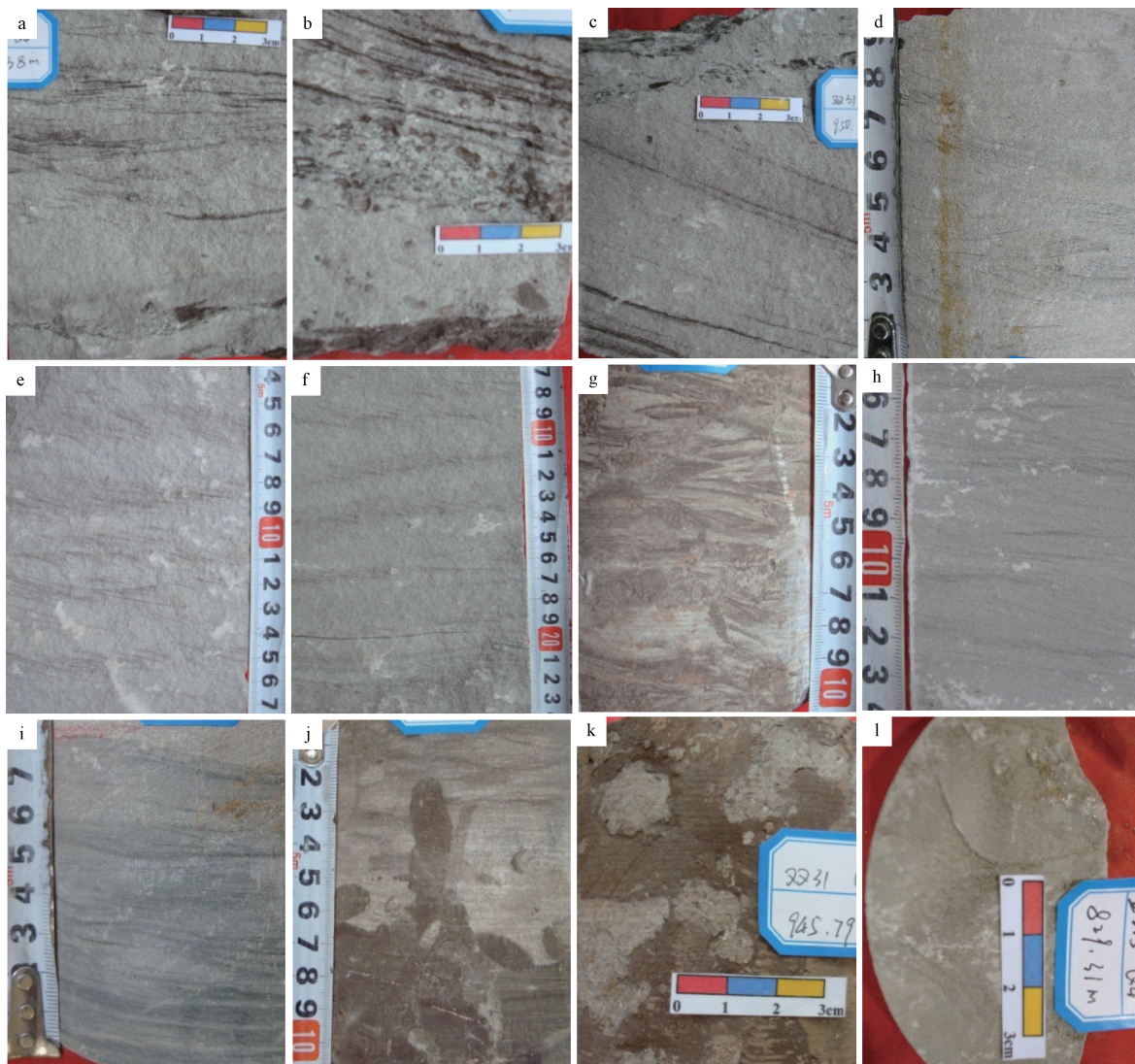


图3 松辽盆地临江地区泉头组四段典型岩心照片

Fig. 3 Typical core photos in the 4th member of the Quantou Formation in Linjiang area, the Songliao Basin

a. 灰色细砂岩,可见冲刷面构造、槽状交错层理及紫红色泥质沉积,双31井,泉四段,埋深950.38 m;b. 灰色细砂岩,见冲刷面构造、平行层理及紫红色泥砾,双31井,泉四段,埋深951.82 m;c. 灰色细砂岩,发育平行层理,顶部见冲刷侵蚀面,双31井,泉四段,埋深950.5 m;d. 灰色粉砂岩,见小型槽状交错层理,五204井,泉四段,埋深751.71 m;e. 灰白色粉砂岩,发育小型板状交错层理且见紫红色泥质成分,双31井,泉四段,埋深948.2 m;f. 灰色粉砂岩,发育小型板状交错层理,五204井,泉四段,埋深748.4 m;g. 紫红色泥质粉砂岩,见纱纹层理,双31井,泉四段,埋深905.2 m;h. 灰色粉砂岩,见纱纹层理,五204井,泉四段,埋深746.31 m;i. 深灰色泥质粉砂岩,见水平层理及波状层理,五204井,泉四段,埋深743.5 m;j. 紫红色泥质粉砂岩见生物钻孔,双42井,泉四段,埋深1672.95 m;k. 紫红色泥岩,见钙质结核,双31井,泉四段,埋深945.79 m;l. 灰绿色粉砂质泥岩,见黄铁矿晶体,五215井,泉四段,埋深829.31 m

分支河道细截点粒径 Φ 值为 3.4, 跳跃总体占 50%, 悬浮总体增至 50% 左右, 说明河道沉积水动力条件受湖水阻挡呈逐渐减弱; 席状砂粒度累计曲线具两段式特征, 以跳跃组分为主, 含量约占 75%, 悬浮总体约占 25%, 细截点粒径 Φ 值为 5.3, 颗粒分选性较好, 反映出席状砂多沉积于水动力条件较强的波浪淘洗环境 (图 4)。在空间分布方面, 以三 6 井为例, 其上部的 776.2 m 处的砂岩粒径明显小于下部 852.29 m 处砂岩粒径, 说明随着水体上升, 沉积物粒度也在逐渐变小 (图 4a, c)。

2.4 泥岩发育特征

泥岩发育特征对于解释古沉积环境及其变化具有重要意义。退积型浅水三角洲沉积过程中, 泥岩发育的典型特征表现为颜色逐渐由氧化色向还原色过渡, 并且三角洲平原泥岩较前缘泥岩厚度大, 夹层少。临江工区泉四段沉积过程中, 三角洲平原普遍发育大套厚层状紫红色泥岩沉积, 而三角洲前缘则主要为厚度较薄的灰绿色泥岩, 多与泥质粉砂岩或粉砂质泥岩互层。通过对工区内泉四段具有颜色的泥岩录井资料进

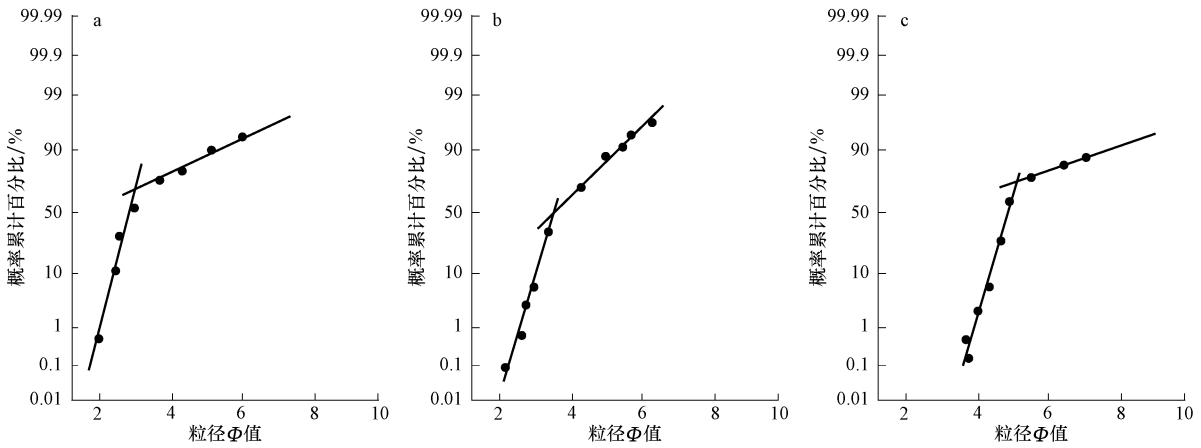


图 4 松辽盆地临江地区泉四段不同微相砂体粒度概率累计曲线特征

Fig. 4 Grain size cumulative probability curves of different sandstone microfacies of the 4th member of the Quantou Formation in Linjiang area, the Songliao Basin

a. 三角洲平原分支河道, 细砂岩, 三 6 井, 埋深 852.29 m; b. 三角洲前缘水下分支河道, 粉细砂岩, 双 201 井, 埋深 845.99 m; c. 三角洲前缘席状砂, 粉砂岩, 三 6 井, 埋深 776.2 m

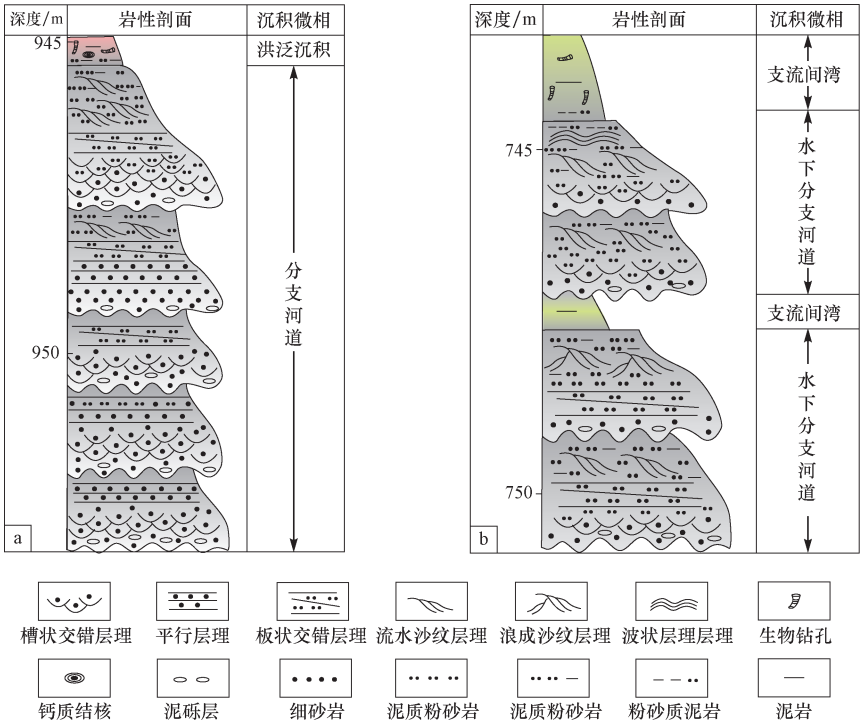


图 5 松辽盆地临江地区泉四段河道沉积典型结构剖面特征

Fig. 5 Typical architecture profiles of channel deposits within the 4th member of the Quantou Formation in Linjiang area, the Songliao Basin

a. 三角洲平原河道沉积剖面, 双 31 井; b. 三角洲前缘水下分支河道剖面, 五 204 井

行统计分析发现, 层序格架内灰色或灰绿色泥岩厚度占泥岩总厚度的比例纵向上总体呈现单一上升特征: SQ1 沉积时期还原色泥岩平均所占比例为 18.4%, SQ2 沉积时期为 21.2%, SQ3 沉积时期为 66.8%。上述这些现象说明研究区泉四段沉积时期水体较浅且具有动荡上升的特征。

2.5 分流河道沉积特征

分流河道为三角洲沉积体系的骨架构成单元, 是三角洲砂体分布的主要相带。在退积型浅水三角洲

中, 由于受到地形坡度、水体能量以及湖浪等因素的影响, 分流河道沉积特征在不同的区域也有所差异。在三角洲平原, 河道多分叉且砂体沉积厚度通常较大, 为多期河道沉积充填的结果, 其沉积序列自下而上为具冲刷面构造的含泥砾细砂岩或平行层理细砂岩、中型槽状或板状交错层理粉细砂岩、流水沙纹层理泥质粉砂岩等, 其中冲刷泥砾和纹层间的细粒沉积物多为紫红色(图 5a)。在浅水三角洲前缘相带中, 河道常延伸较远, 远离湖岸数十公里位置仍可存在河道沉积, 但随着水体的上升, 河道砂体发育规模相对较小, 连续沉积

砂体薄且期次少,其沉积序列自下而上为薄层泥砾层或中、小型槽状交错层理粉细砂岩、小型板状交错层理粉砂岩、流水沙文层理或波状层理泥质粉砂岩、水平层理粉砂质泥岩等,其砂体底部的冲刷泥砾较少见且多为灰色或灰绿色,沉积结构具有典型湖浪改造特征(图5b)。

3 退积型浅水三角洲沉积相演化特征

总体上呈单一变化的沉积水体决定了退积型浅水三角洲在沉积相演化方面具有较强的规律性。松辽盆地白垩系泉头组四段沉积期整个盆地处于稳定下拗阶段,临江地区泉四段总体上表现为水体上升的退积沉积序列,沉积物颜色逐渐由氧化色向还原色过渡,沉积环境由三角洲平原整体过渡到三角洲前缘,区域地层沉积厚度变化较小,具有典型的退积型浅水三角洲沉积特征(图6,图7)。

泉四段 SQ1 沉积时期,松辽盆地湖泊范围较小,主要分布在古龙—三肇凹陷中心地带,研究区沉积水体在此时期最浅。根据沉积特征分析,整个湖盆水体由泉三段末期的稳定下降开始转入稳定上升阶段,临江地区此时期以发育浅水三角洲平原亚相沉积为主,南部靠近物源区发育部分的曲流河相沉积,再由曲流河进入三角洲地带,河道较为发育且分叉改道明显,具有“格网状”特征。录井剖面中常见两套厚层砂体,主要为灰色细砂岩或粉砂岩,砂体间通常为紫红色泥岩夹泥质粉砂岩或粉砂质泥岩,由下至上夹层逐渐增多。

泉四段 SQ2 沉积时期,盆地持续稳定下拗,湖盆范围有所扩大,水体上升较为明显。该时期曲流河相不再发育,整个研究区以浅水三角洲平原为主,在北部开始发育浅水三角洲前缘沉积,河道发育规模较前一时小。通过对层内单井岩性观察分析,该层序内部两套河道沉积砂体较少发育,砂体厚度相对较薄,以灰色细粉砂岩为主。河道间主要为紫红色泥岩沉积,部分泥岩颜色为灰绿色,泥岩向上夹层有明显增多趋势且灰绿色沉积物也更为常见,表明该时期研究区水体较为动荡,具有长期上升、短期下降的特征。

泉四段 SQ3 沉积时期,沉积水体持续上升,水体达到泉头组最深时期。临江地区该时期以浅水三角洲前缘沉积为主,不发育平原亚相沉积。现存河道沉积规模较前两个层序更小,但在远离湖岸的区域仍可发育河道沉积,部分河道砂体可出现在泉四段顶部,与青山口组油页岩直接接触,这说明在该时期仍存在短期的湖平面波动,使得河道在水体下降时期进入湖盆中心形成河道砂体,但这些砂体在上升水体的影响下,通

常较薄且具席状砂化特征。该时期泥岩颜色以灰绿色为主,在层序底部可见少量紫红色,并且泥岩与薄层粉砂岩频繁互层。这些特征表明研究区退积型浅水三角洲沉积不仅受控于河流沉积作用,同时受到了湖浪改造作用的影响。

4 退积型浅水三角洲砂体展布规律

“找砂”是三角洲相带油气勘探的主要工作之一,砂体的发育特征及分布规律通常受到多种因素的影响^[9,13,20]。在退积型浅水三角洲中,河道沉积砂体作为三角洲砂体的主要构成部分,同时也是后期湖浪改造砂体的基本来源。与通常所说的三角洲沉积相比,该类型三角洲砂体在纵向发育特征及平面展布规律等方面具有单一变化的趋势特征。

4.1 纵向砂体发育特征

通过对研究区钻遇泉四段的钻井资料进行统计分析发现,泉四段河道砂体主要发育于地层中部和下部,其出现的频率及规模由下至上呈逐渐减小的趋势。区内 29 口单井层序格架内的连续沉积河道砂体发育情况的统计资料显示, SQ1 时期所有单井累积河道砂体总厚度为 193.6 m, SQ2 时期为 101.7 m, SQ3 时期仅为 41.2 m(表 1)。此外,根据顺物源方向上的连井对比剖面也可看出(图 6),测井曲线呈箱形或钟形的连续沉积河道砂体主要分布于以三角洲平原沉积为主的 SQ1 和 SQ2 两个层序内,且砂体具有较好的横向对比性。到 SQ3 三角洲前缘沉积时期,可以发现河道砂体数量明显减少,厚度变薄且连通性变差,具有席状砂化特征。在相带分布上表现为下部的三角洲平原分支河道砂较上部的三角洲前缘水分支河道砂更为发育且连通性更好。这些河道砂体的纵向发育特征说明退积型浅水三角洲砂体沉积受到了上升水体的控制作用。

4.2 平面砂体演化规律

通过统计研究区所有单井层序格架内的砂岩总厚度(包括细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩),结合优选地震属性,运用地震沉积学方法,对临江工区泉四段层序格架内砂体展布进行了刻画。

地震沉积学研究发现,研究区地震振幅属性能够较好的反映砂体的发育特征(图 8)。层内河道砂体厚度越大,振幅属性值越高,河道砂体厚度越小,振幅属性值越低。SQ1 沉积时期,沉积砂体最为发育,属性图上表现为红色高值区连片存在,落在高值区的井位均钻遇了河道砂体。在砂厚图中砂岩厚度大于 12 m 区域范围较大,单井砂岩平均厚度 8.6 m。SQ2 时期,随

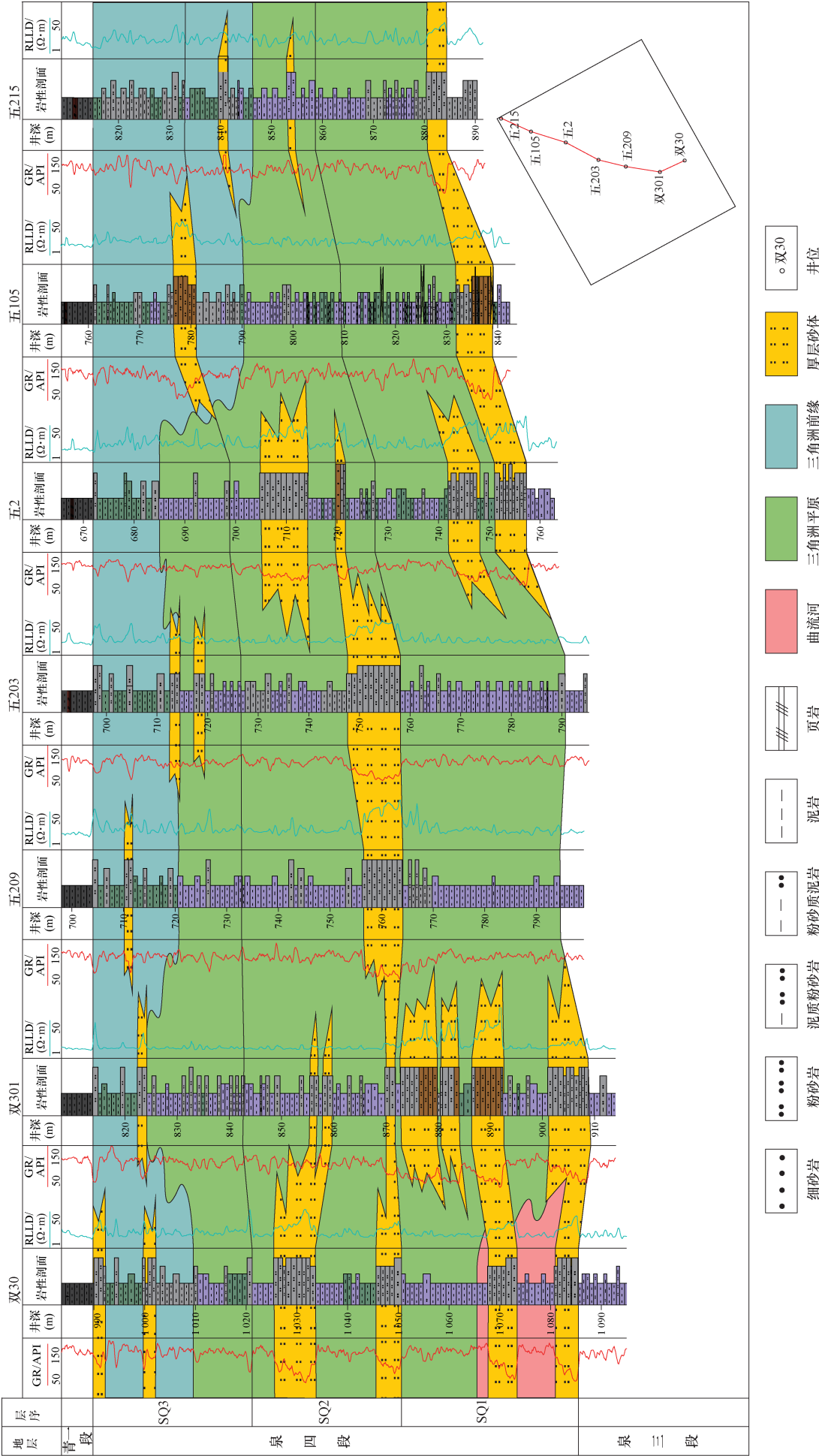


图6 松辽盆地临江地区泉四段双30—五215井连井沉积相剖面及砂体发育特征

Fig.6 Characteristics of channel sandstone development in well correlation profile of Well Shuang30 to Well Wu215 in the 4th member of the Qiantou Formation in Linjiang area, the Songliao Basin

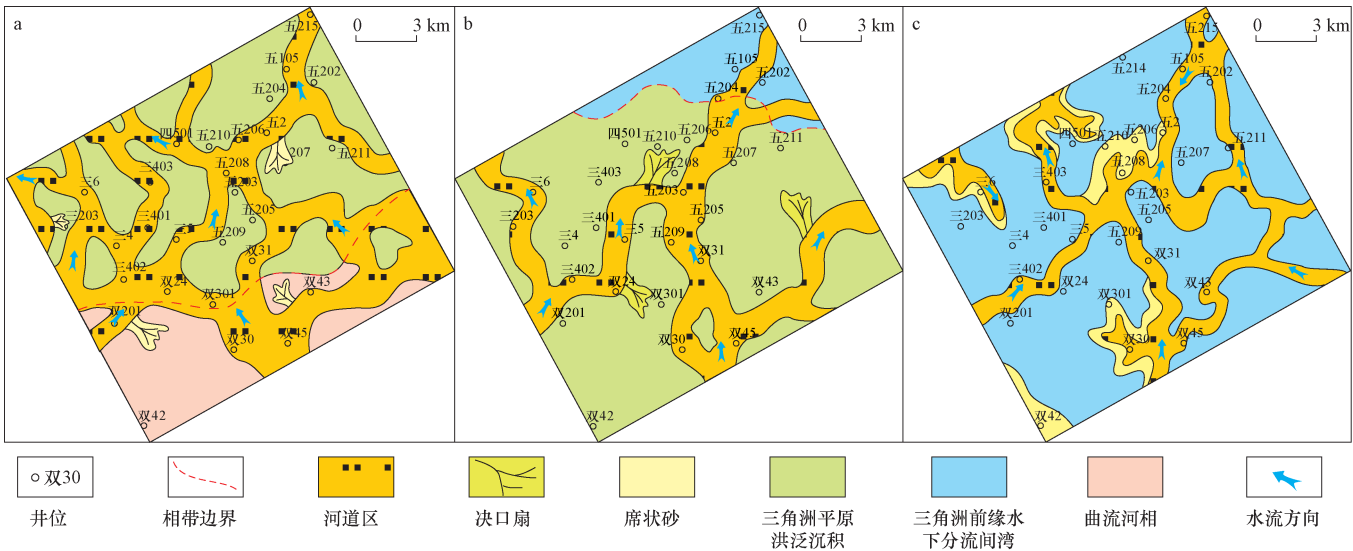


图 7 松辽盆地临江地区泉四段层序格架内退积型浅水三角洲沉积演化

Fig. 7 Sedimentary evolution of retrogradational shallow-water delta within sequence stratigraphic framework of the 4th member of the Quantou Formation in Linjiang area, the Songliao Basin

a. SQ1 沉积相; b. SQ2 沉积相; c. SQ3 沉积相

表 1 松辽盆地临江地区泉四段退积型浅水三角洲连续沉积河道砂体统计

Table 1 Statistics of sequential channel sandstone of retrogradational shallow-water delta in the 4th member of Quantou Formation in Linjiang area, the Songliao Basin

层序地层单元	钻遇井数/口	最大连续沉积厚度/m	最小连续沉积厚度/m	累计总厚度/m
SQ3	9	9.8	2.6	41.2
SQ2	13	10.5	4.0	101.7
SQ1	15	12.0	3.3	193.6

着沉积水体上升,砂体发育程度减弱,振幅属性中高值区较为局限。砂岩厚度向北部呈变薄趋势,该时期砂岩平均厚度为 7.5 m。SQ3 沉积时期,研究区主要发育前缘亚相沉积,砂岩分布更为局限,属性图上中高值区断续分布。砂岩厚度大于 12 m 区域仅分布在离物源较近的研究区南部,砂岩平均厚度为 6.9 m,但在部分远离物源的区域(如五 204 井区)仍可见到河道沉积,部分砂体甚至发育泉四段顶部。这些特征表明,退积型浅水三角洲沉积砂体的分布受到了水体变化的控制:一方面随着水体的总体上升,沉积相带快速演化,层序格架内砂体平面发育程度由下至上、由近源向远源逐渐减弱;另一方面由于湖平面的波动使得河道砂体在水体短期下降时可以深入湖盆中心,形成整个区域皆发育河道沉积的特征。

4.3 退积型浅水三角洲砂体发育模式

通过沉积特征及砂体展布规律分析,在结合前人研究的基础上^[10-11,16,20],总结出了退积型浅水三角洲沉积相展布特征及砂体发育模式(图 9)。

泉四段沉积时期,研究区地形较为平缓,沉积水体逐渐上升,退积型浅水三角洲平原分布范围不断缩小,前缘面积快速扩大,泥岩颜色逐渐由氧化色向还原色过渡,河道沉积由陆向湖不断分叉,沉积砂体厚度逐渐变薄,并且河道末端砂体在上升湖水的波浪作用下呈席状砂化。随着水体上升,沉积卸载区不断向陆退积,后期河道砂体常叠置在前期河道之上,表现为垂向上的砂体发育规模逐渐减小,厚层砂体发育区主要集中在湖平面大规模上升之前的三角洲平原和靠近湖岸的三角洲前缘相带。

5 讨论

前人对于浅水三角洲研究开展了大量工作,但在研究过程中并没有强调不同沉积水体变化对沉积特征及砂体展布等方面所带来的影响,这也导致了許多学者对于浅水三角洲的一些认识还存在争议。如浅水三角洲席状砂是否发育,河道砂体是否广泛存在于三角洲前缘,前缘砂体是否是最有利储集砂体等等^[8-16,20-22]。通过对临江泉四段进行研究发现,在水体上升的背景下,退积型浅水三角洲无论是沉积相还是砂体展布均具有一定的特殊性和规律性,主要体现在以下几个方面。

1) 相带迁移变化快

由于沉积水体呈上升趋势,加上地貌平缓,湖平面小幅度上升即可使三角洲相带边界快速后撤,造成前缘面积的迅速扩大,但是这种相带边界的迁移往往不是单向的,而是在波动式上升水体的影响下呈现快速的双向迁移,其沉积结果之一即表现为泥岩颜色的交

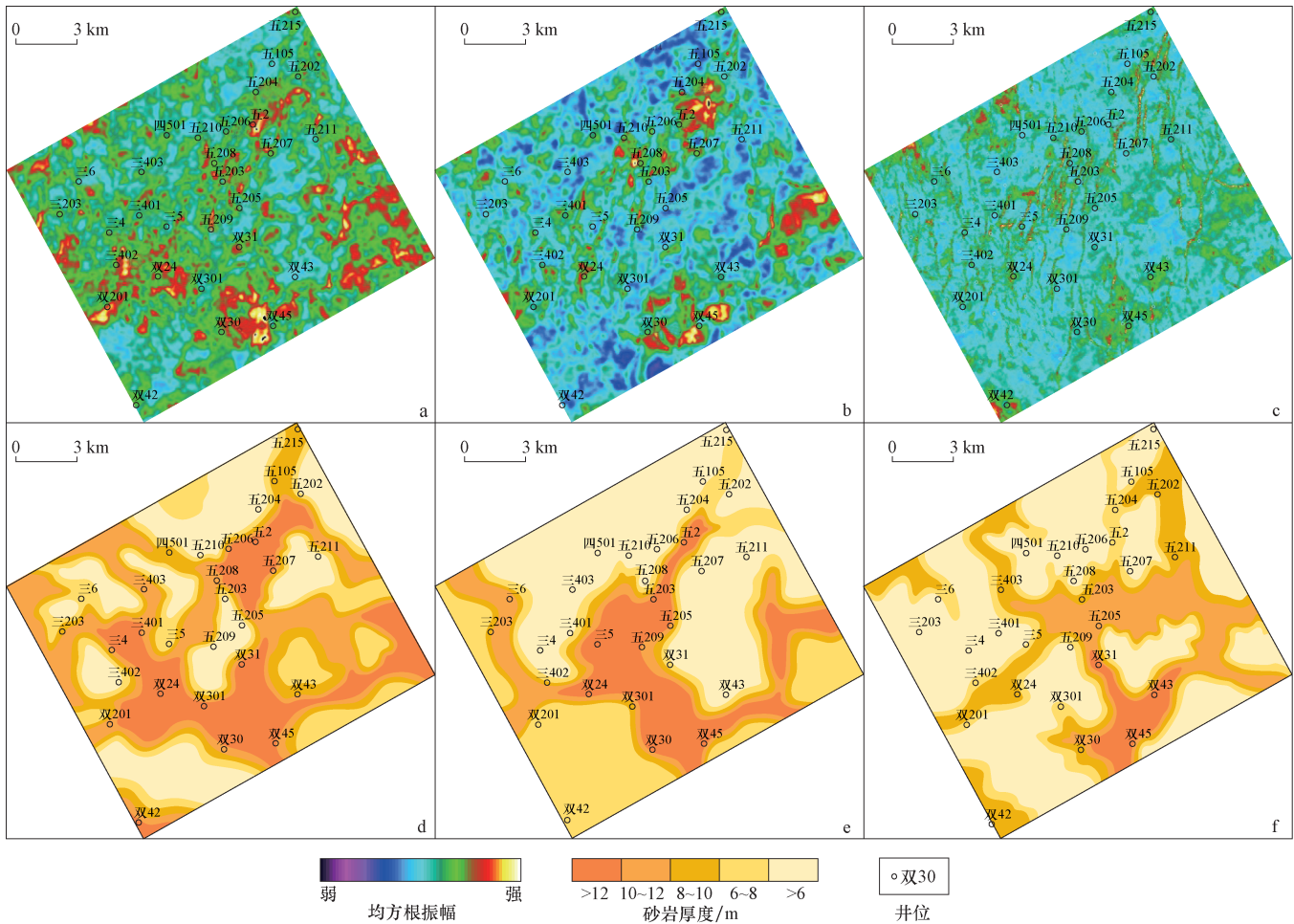


图 8 松辽盆地临江地区泉四段层序格架内砂体发育特征

Fig. 8 Characteristics of sand bodies within sequence stratigraphic framework of the 4th member of the Quantou Formation in Linjiang area, the Songliao Basin

a. SQ1 振幅属性; b. SQ2 振幅属性; c. SQ3 振幅属性; d. SQ1 砂岩厚度; e. SQ2 砂岩厚度; f. SQ3 砂岩厚度

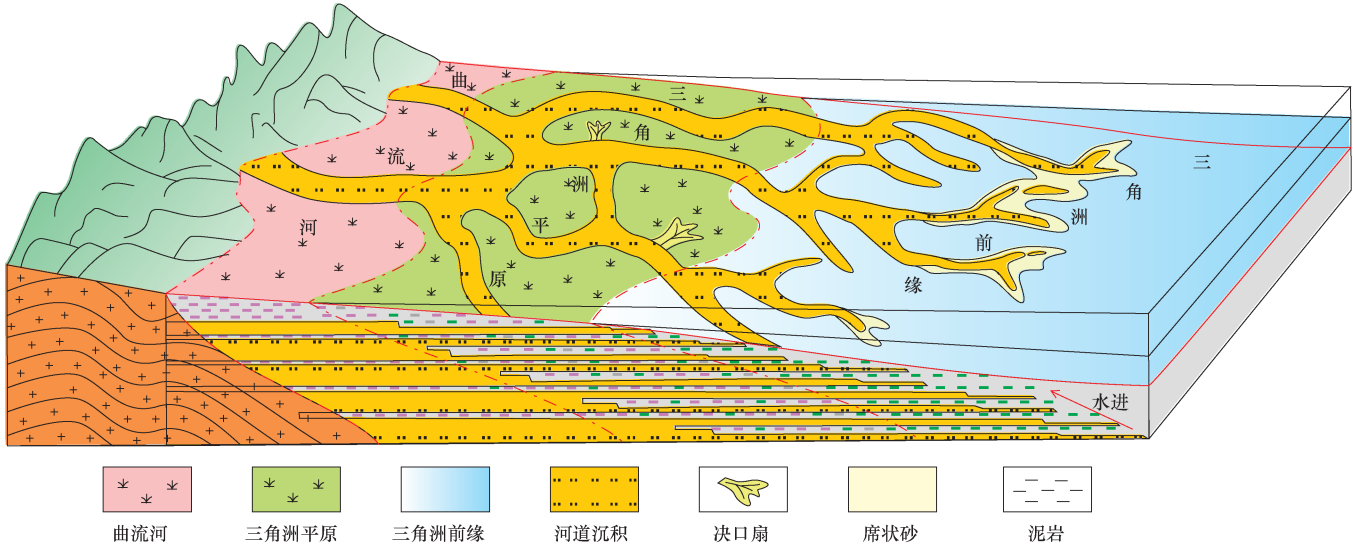


图 9 退积型浅水三角洲沉积砂体发育模式

Fig. 9 Sandstone development models of retrogradational shallow-water delta

替变化,并且浅水湖盆沉积水体的波动性和相带边界的迁移特征也可从现今鄱阳湖湖平面变化中得到佐

证。如 2013 年 5 月鄱阳湖连通水域面积达 3 076 km²,而同年 11 月鄱阳湖水域面积仅为 1 449 km²。

2) 砂体分布范围广

湖平面波动和相边界的快速迁移是造成前缘砂体广泛分布的原因。以 SQ3 为例,尽管该层序砂体厚度整体偏薄,但在远离湖岸的井区仍然可以见到典型的河道沉积,部分河道砂体甚至与青山口组黑色油页岩直接接触,这就是由于湖平面的短期下降,河道沉积迅速向湖泊中心推进。而随后的水体快速上升,使得该期砂体沉积终止,并且离湖岸较远河道末端砂体在湖浪改造下呈现席状砂化,在测井曲线表现为指状的薄层砂体。

3) 纵向砂体发育规模减小

尽管退积型三角洲砂体分布广泛,但主体河道砂沉积分布特征具有一定的趋势性。随着沉积水体的加深河道砂体规模逐渐减小,主要表现为纵向上沉积河道期次减少,连续沉积砂体厚度变薄,平面上砂厚高值区范围逐渐缩小,以三角洲平原和靠近湖岸的三角洲前缘相带中河道砂体最为发育。但需要注意的是,受短期湖平面波动的影响,在远离湖岸的区域同样也可以发育河道砂体,这类砂体若与上覆青山口组黑色油页岩接触,也可以成为岩性油气藏的有利勘探目标。

6 结论

1) 退积型浅水三角洲在沉积相类型、沉积构造、河道沉积及泥岩发育等方面具有一定的特殊性。在上升水体的控制下,三角洲前缘亚相更有利于发育并在局部可形成席状砂沉积。河道砂体常为多期河道沉积充填的产物,入湖后河道沉积厚度、期次以及冲刷强度呈逐渐减弱趋势。泥岩中钙质结核普遍发育,泥岩颜色由下至上逐渐由氧化色向还原色过渡且常交替出现,表明研究区水体较浅且具有波动式上升的特征。

2) 受波动式上升水体的控制,退积型浅水三角洲的沉积演化存在长期和短期两种变化。长期来看,随着水体的上升,研究区泉四段沉积相逐渐由三角洲平原向前缘过渡,河道发育规模逐渐减弱。短期来看,这种沉积演化趋势中包含了多次的湖平面升降,也就是说沉积相边界的迁移实际上是双向的,这一解释对于寻找泉头组顶部、青山口组底部的普遍含油的河道砂储层具有重要意义。

3) 退积型浅水三角洲砂体展布规律与沉积水体变化密切相关。在湖平面上升过程中,河道砂体在纵向上表现为连续沉积厚度逐渐减薄,平面上表现为由陆向湖砂体发育程度逐渐减弱,离岸较远的河道末端砂体经上升水体的改造后呈席状砂化。但是受短期湖

平面波动影响,现今看来远离湖岸的区域仍可以发育河道沉积,这些砂体特别是靠近青山口组的砂体由于良好的生储配置关系往往也是岩性油气藏勘探的有利目标。

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] Postma G. An analysis of the variation in delta architecture [J]. *Terra Nova*, 1990, 2(2): 124-130.
- [3] 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.
- [4] 赵翰卿. 松辽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.
Zhao Hanqing. A sedimentary scheme for a large leaf-like delta in Songliao Basin [J]. *Petroleum Geology & Oil-field Development in Daqing*, 1987, 6(4): 1-10.
- [5] 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.
Yao Guangqing, Ma Zheng, Zhao Yanchao, et al. Reservoir characteristics of distributary channel sand bodies of shallow water delta [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(1): 24-31.
- [6] 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.
Lou Zhanghua, Lan Xiang, Lu Qingmei, et al. Controls of the topography, climate and lake level fluctuation on the depositional environment of a shallow-water delta: A case study of the Cretaceous Putaohua reservoir [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(1): 83-92.
- [7] 赵伟, 邱隆伟, 姜在兴, 等. 断陷湖盆萎缩期浅水三角洲沉积演化与沉积模式: 以东营凹陷牛庄洼陷古近系沙三段上亚段和沙二段为例 [J]. *地质学报*, 2011, 85(6): 1019-1027.
Zhao Wei, Qiu Longwei, Jiang Zaixin, et al. Depositional evolution and model of shallow-water delta in the rifting lacustrine basins during the shrinking stage: A case study of the third member and second member of Paleogene Shahejie Formation in the Niuzhuang Subsag, Dongying Sag [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(6): 1019-1027.
- [8] 王立武. 断陷湖盆浅水三角洲的沉积特征: 以松辽盆地南部姚一段为例 [J]. *沉积学报*, 2012, 30(6): 1053-1060.
Wang Liwu. Forming conditions and depositional characteristics of shallow-water deltas in depression basins: A case study of K₂y¹ in the south of Songliao Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(6): 1053-1060.
- [9] 纪友亮, 卢欢, 刘玉瑞. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组一段浅水三角洲和滩坝沉积模式 [J]. *古地理学报*, 2013, 15(5): 729-740.
Ji Youliang, Lu Huan, Liu Yurui. Sedimentary model of shallow water delta and beach bar in the member 1 of Paleogene Funing Formation in Gaoyou sag, Subei Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(5): 729-740.
- [10] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 大型断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 [J]. *地学前缘*,

- 2012, 19(1): 89–99.
- 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[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 89–99.
- [11] 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 大型坳陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 19–28.
- Zhu Xiaomin, Deng Xiuqin, Liu Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine; an example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 19–28.
- [12] 朱筱敏, 赵东娜, 曾洪流, 等. 松辽盆地齐家地区青山口组浅水三角洲沉积特征及其地震沉积学响应[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 889–897.
- Zhu Xiaomin, Zhao Dongna, Zeng Hongliu, et al. Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of shallow-water delta of Qingshankou Formation in Qijia area, Songliao Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 889–897.
- [13] 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等. 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.
- Zhu Weilin, Li Jianping, Zhou Xinhui, et al. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(4): 575–582.
- [14] 胡明毅, 马艳荣, 刘仙晴, 等. 大型坳陷型湖盆浅水三角洲沉积特征及沉积相模式: 以松辽盆地茂兴-敖南地区泉四段为例[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(3): 13–17.
- Hu Mingyi, Ma Yanrong, Liu Xianqing, et al. Sedimentary characteristics and mode of shallow delta in large scale downwrap lacustrine basin by taking Quan-4 Formation in Maoxing and Aonan region in Songliao basin for example[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(3): 13–17.
- [15] 操应长, 韩敏, 王艳忠, 等. 济阳坳陷车镇凹陷沙二段浅水三角洲沉积特征及模式[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 576–582.
- Cao Yingchang, Han Min, Wang Yanzhong, et al. Sedimentary characteristics and models of shallow-water delta deposits in the second member of the Shahejie Formation in the Chezhen Sag, the Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 576–582.
- [16] 张昌民, 尹太举, 朱永进, 等. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 933–944.
- Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhu Yongjin, et al. Shallow-water deltas and models[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 933–944.
- [17] 孙雨, 马世忠, 闫百泉, 等. 浅水湖盆河控三角洲短期基准面旋回结构样式与沉积演化: 以松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(8): 3406–3414.
- Sun Yu, Ma Shizhong, Yan Baiquan, et al. Sedimentary evolution and structure types of short-term base-level cycle sequences of shallow lacustrine fluvial-dominated delta; example of Fuyu oil layer in southern Fuxin uplift of Songliao Basin[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(8): 3406–3414.
- [18] 陈方文, 卢双舫, 石美娟. 松辽盆地王府凹陷断层特征及对油气的控制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(1): 249–257.
- Chen Fangwen, Lu Shuangfang, Shi Meijuan. Characteristics of fault and its control on oil-gas in Wangfu Depression of Songliao Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(1): 249–257.
- [19] 刘振文, 张智礼, 王佰长, 等. 松辽盆地三肇地区扶余油层和杨大城子油层介形类古生态及沉积环境探讨[J]. 中国地质, 2006, 33(5): 1159–1166.
- Liu Zhenwen, Zhang Zhili, Wang Baichang, et al. Paleocology and sedimentary environment of ostracods in the Fuyu and Yangdachengzi oil horizons in the San Zhao area, Songliao Basin[J]. Geology in China, 2006, 33(5): 1159–1166.
- [20] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 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.
- Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow -water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(6): 813–825.
- [21] 黄秀, 刘可禹, 邹才能, 等. 鄱阳湖浅水三角洲沉积体系三维定量正演模拟[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2013, 38(5): 1005–1013.
- Huang Xiu, Liu Keyu, Zou Caineng, et al. Forward stratigraphic modeling of the depositional process and evolution of shallow water delta in the Poyang Lake, Southern China[J]. Earth Science-Journal of China University of Geoscience, 2013, 38(5): 1005–1013.
- [22] 刘自亮, 沈芳, 朱筱敏, 等. 浅水三角洲研究进展与陆相湖盆实例分析[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 596–604.
- Liu Ziliang, Shen Fang, Zhu Xiaomin, et al. Progress of shallow-water delta research and a case study of continental lake basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(4): 596–604.

(编辑 张玉银)