

高分辨率层序格架内储层砂体发育特征

——以松辽北部州311地区泉三、泉四段为例

孙春燕^{1,2,3}, 胡明毅^{1,2,3}, 胡忠贵^{1,2,3}, 邓庆杰^{1,2,3}

(1. 长江大学 沉积盆地研究中心, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 非常规油气湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430100;

3. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

摘要:为了刻画松辽北部州311地区泉三、泉四段储层砂体沉积特征,为该区隐蔽性砂岩油气藏的勘探和开发提供新证据,以高分辨率层序地层学和储层沉积学理论体系为指导,结合岩心、测井曲线以及区域地震资料,识别出六种短期基准面旋回发育样式,建立层序地层划分方案,进而分析层序格架内储层砂体发育类型及特征。研究表明:泉三、泉四段内部可划分2个长期基准面旋回(Q3-LSC1—Q4-LSC1)、5个中期基准面旋回(Q3-MS1—Q4-MS3)、12个短期基准面旋回(Q3-SSC1—Q4-SSC7)。短期基准面旋回主要发育以上升半旋回为主的不对称型结构(A₁、A₂、A₃)、上升半旋回与下降半旋回接近相等的近完全—完全对称型结构(C2)、以上升半旋回或下降半旋回为主的不完全对称型结构(C1、C3)。泉三、泉四段垂向上表现为基准面上升—下降—上升的演变规律,发育分流河道—曲流河道—分流河道—水下分流河道纵向沉积演化序列,河道砂体发育样式从较少叠置到较多垂向或侧向叠置型,再逐渐过渡到孤立型。基于高分辨率层序地层划分和对比,在短期基准面旋回约束下,解剖曲流河道砂体、分流河道砂体、水下分流河道砂体沉积剖面及内部旋回结构特征,其中Q4-SSC1和Q3-SSC5沉积时期河道砂体普遍油浸,砂体连续沉积厚度相对较大,为最有利的砂体分布层位。由于储层内部存在复杂的非均质性,因此,进行河道砂体精细解剖势在必行。

关键词:河道砂体;基准面旋回;高分辨率层序地层;泉头组;州311地区;松辽盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Characteristics of reservoir sand bodies within high-resolution sequence framework: A case from the 3rd and 4th members of Quantou Formation in Zhou 311 area, northern Songliao Basin

Sun Chunyan^{1,2,3}, Hu Mingyi^{1,2,3}, Hu Zhonggui^{1,2,3}, Deng Qingjie^{1,2,3}

(1. Research Center of Sedimentary Basin, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

2. Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

3. School of Geoscience, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: To provide more information for exploration and development of the subtle sandstone oil and gas reservoirs in Zhou 311 area of Northern Songliao Basin, it is necessary to describe the sedimentary characteristics of reservoir sand bodies in the 3rd and 4th members of Quantou Formation. Six short-term base-level cycles were identified under the guidance of high resolution sequence stratigraphy and reservoir sedimentology theories and through integration of core, logging and regional seismic data, and were used to establish a sequence stratigraphic division scheme. The types and characteristics of reservoir sand bodies were analyzed within the established sequence framework. The 3rd and 4th members of Quantou Formation can be divided into two long-term base-level cycles (Q3-LSC1 - Q4-LSC1), five medium-term base-level cycles (Q3-MS1 - Q4-MS3), and twelve short-term base-level cycles (Q3-SSC1 - Q4-SSC7). The short-term base-level cycles mainly develop asymmetric structure dominated by ascending half cycles (A₁, A₂, A₃), almost complete-symmetrical structure with ascending and descending half cycles being nearly equal (C2), incomplete symmetrical structure dominated by either ascending half cycles or descending half cycles (C1, C3). Vertically, the evolution of the

收稿日期:2016-08-02;修订日期:2017-07-10。

第一作者简介:孙春燕(1989—),女,博士研究生,地震沉积学与层序地层学。E-mail:schunyan89@163.com。

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

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05013-006);湖北省创新群体基金项目(2015CFA024)。

3rd and 4th members of Quantou Formation shows a pattern of base level rising, falling, and then rising. The vertical sedimentary evolution sequence is distributary channel-meandering channel-distributary channel-underwater distributary channel. The channel sand body types develop from less overlap to more vertical or lateral overlap, and then gradually change to isolated type. Characteristics of sedimentary section and internal sedimentary cycle structure of the meandering channel sand bodies, distributary channel sand bodies, underwater distributary channel sand bodies are analyzed on the basis of high-resolution sequence stratigraphy division and correlation and under the control of short-term base-level cycles. The sand bodies were mostly oil-immersed and thick during the deposition of Q4-SSC1 and Q3-SSC5, thus they are most favorable for quality sand body development. In the process of fine exploration and development, fine description of channel sand bodies is imperative due to the complex heterogeneity within the reservoir.

Key words: channel sand body, base level cycle, high resolution sequence stratigraphy, Quantou Formation, Zhou 311 area, Songliao Basin

松辽盆地三肇凹陷白垩系泉头组扶余油层是松辽北部重点的油气勘探领域之一,多年来前人对该区开展了广泛深入的油气地质综合研究,但是由于小层识别和对比精度不高,导致目前动用程度总体偏低,已发现和证实的油气田与盆地资源潜力相差甚远。因此,应用国内外学者 Vail (1977)^[1]、Corss (1994)^[2]、邓宏文 (1995)^[3]、郑荣才 (2000)^[4] 等提出的高分辨率层序地层理论和方法,开展地层划分和对比研究,对该区储层砂体分布预测和油气勘探具有重要指导意义。在松辽盆地北部的地层研究中,不同学者对层序划分的观点有所不同,魏魁生 (1997) 认为泉一段至泉三段中下部为 1 个二级层序,泉三段中下部至姚二段近顶部为 1 个二级层序^[5];郭少斌 (1998)^[6]、李群 (2002)^[7] 将泉头组一、二、三、四段统一归类为 1 个二级层序。邓宏文 (2007)^[8] 将泉头组三、四段划分为 3 个三级层序、5 个四级层序。由上述可知,松辽盆地白垩系泉头组的层序划分方案差异较大,根本原因在于,不同学者在研究过程中所依赖的资料、研究的侧重点不同,对各级层序的划分没有统一标准,导致了松辽盆地不同层位层序划分方案众多。

本次研究以泉头组三、四段为研究的目的层位,通过 15 口典型取心井精细岩心观察描述,以及区域地震反射特征、测井、录井等标志,将泉头组三、四段划分为 5 个中期基准面旋回 Q3 - MSC1—Q4 - MSC3、12 个短期基准面旋回 Q3 - SSC1—Q4 - SSC7。在此基础上建立了研究区连井层序地层格架,精细分析了研究区泉头组三、四段不同类型河道砂体的沉积特征,厘清复合型河道砂体内部的沉积旋回,有利于判别垂向上砂体的叠置特征和横向上井间砂体连通性对比,指导该区有利储集砂体的分布和预测。

1 地质概况

松辽盆地是我国东北部地区的一个中生代大型陆相含油气盆地,葡萄花油层和扶余油层为其主力油层,油气资源量异常丰富。盆地整体呈北北东走向,外形大致呈菱形,全盆地总面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。三肇凹陷位于松辽盆地的中心构造带,构造背景来看位于松辽盆地东南隆起区及北部中央凹陷区,朝阳沟阶地以北,绥化凹陷西南部^[9],面积为 $5\,576 \text{ km}^2$ 。州 311 地区位于黑龙江省肇州县境内,大庆市东南缘,安达市以南 (图 1)。构造上,州 311 地区位于松辽盆地北部中央坳陷区,位于三肇凹陷西南部,面积为 327.023 km^2 ,从地理位置上来看,位于北纬 $44^\circ 49' \sim 46^\circ 0.5'$,东经 $124^\circ 54' \sim 126^\circ 12'$ 的区间内。

泉头组 (K_1q) 是松辽盆地拗陷早期沉积的地层,研究层位自下至上为泉三段、泉四段。泉三段沉积厚度约 $355.5 \sim 375 \text{ m}$,岩性主要为紫红色泥岩、灰白色粉—细砂岩;泉四段厚度约 $99.5 \sim 123 \text{ m}$,岩性主要为灰绿色泥岩与灰白色粉—细砂岩互层。本组与下伏登娄库组表现为整合—平行不整合接触。

2 基准面旋回界面识别标志

州 311 地区泉头组三、四段发育一个完整的上升—下降旋回组合,上覆青一段底部有三套油页岩,其中第二套油页岩区域上分布较为稳定,为松辽盆地最大湖泛时期的产物,可作为三级层序对比标志层 (图 2a)。扶余油层顶部界面在自然伽马值向上明显增大的拐点处 (高电阻层以下的 $4 \sim 6 \text{ m}$ 处),地震剖面上

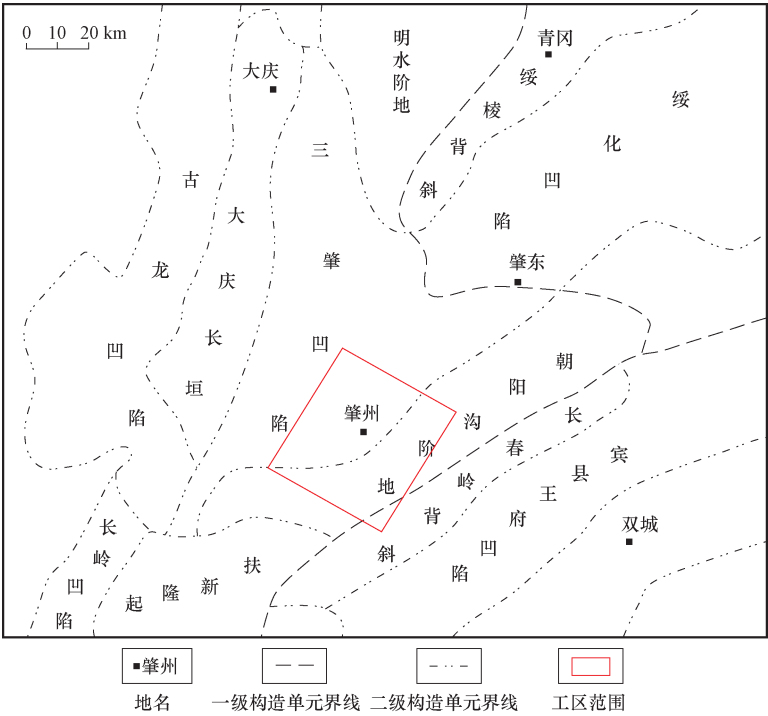


图 1 松辽北部州 311 地区构造位置

Fig. 1 Structure location of Zhou 311 area,northern Songliao Basin

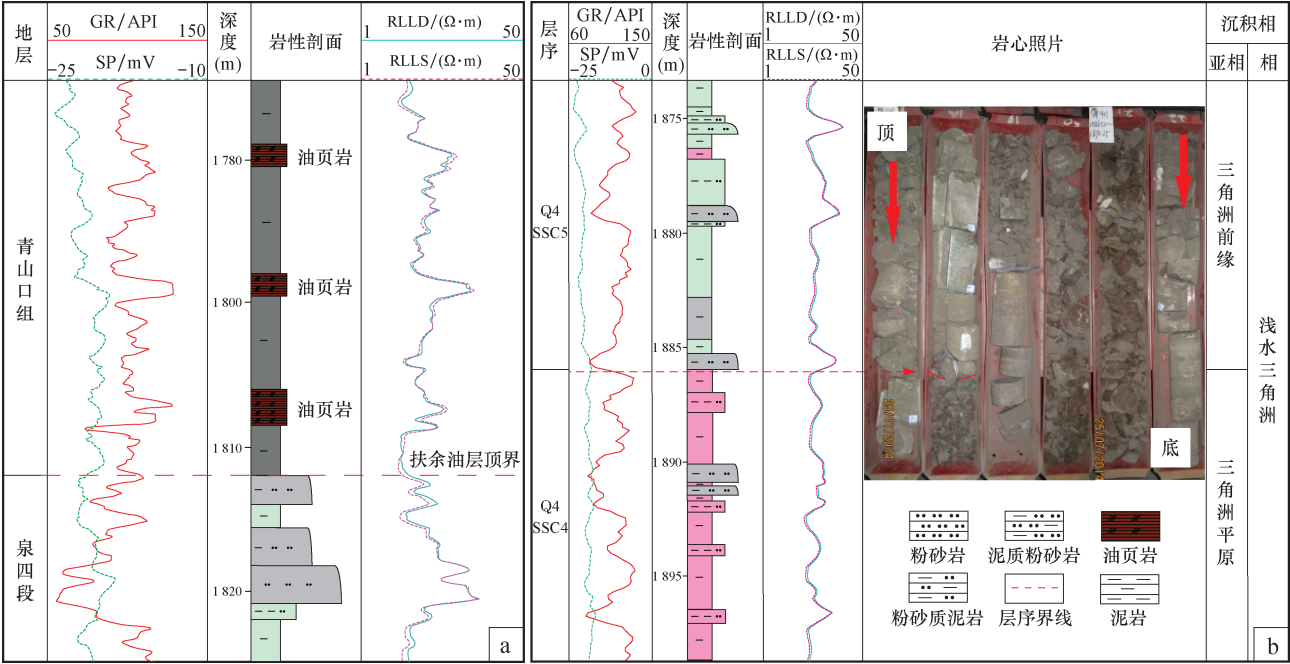


图 2 州 311 地区扶余油层顶部岩电特征及肇 411 井泉四段内部层序识别界面

Fig. 2 Lithologic and electrical characteristics of Fuyu oil layer and the sequence interfaces of the 4th Member of Quantou Formation of Well Zhao 411 in Zhou 311 area

为一明显的中-强振幅、低频、高连续的 T_2 反射层,区域上表现为一组稳定的反射同相轴,可进行连续追踪对比,是区域性稳定的一级标准层,可作为典型的区域时间地层对比标志^[10]。

2.1 岩性剖面

根据沉积物颜色、沉积构造、砂泥岩厚度以及底冲刷面等标志,可推测河道砂体旋回发育期次。①底冲

刷构造,不同时期不同水动力条件下,河道下切与充填作用产生的底冲刷面可能不同,由此可推测储层砂体的成因类型;②沉积间断面,如肇 411 井取心 1 886.35 m 处发育紫红色泥岩,一般在近岸地带容易形成,沉积物明显遭受分化,多伴生钙质结核、植物根茎类化石,可作为泉四段内部短期旋回界面(图 2b);③岩性-岩相转换界面,比如正韵律相序反映向上变浅的沉积过程,反韵律相序反映向上变深的沉积过程,而两者的转换处多能作为层序划分界面;④砂、泥岩厚度明显变化处,比如由下至上,砂泥岩含量比值向上越小,粒度向上变细,呈现出正旋回变化特征;⑤泥岩颜色,可作为指相标志,比如浅水三角洲相中灰绿色泥岩指示三角洲前缘水下还原环境,紫红色泥岩指示三角洲平原陆上氧化环境。

2.2 测井曲线

测井曲线的形态特征可以用来识别垂向沉积序列,顶底接触关系分为突变与渐变两种类型,主要用来

反映研究区沉积环境和水动力条件强弱变化^[11]。测井曲线上箱型、线形、指状之间的突变和渐变,对应不同的沉积微相发育类型,通过建立短期旋回与测井曲线的对应关系,来指导全区层序划分。

3 高分辨率层序地层格架

3.1 短期旋回结构样式

以郑荣才等(2001)对陆相盆地短期基准面旋回研究理论和思路为指导^[12],将间歇暴露、冲刷间断面、岩相突变面作为层序边界识别标志,总结出研究区短期旋回发育样式(图 3)。以洪泛面为对称轴,按照上、下两个时间单元厚度的变化关系,可细分为 3 个亚类型:①以上升半旋回为主的不对称型结构(A1,A2,A3);②上升与下降半旋回接近相等的近完全-完全对称型结构(C2);③以上升或下降半旋回为主的不完全对称型结构(C1,C3)。其中 A3 型在研究区较少见。

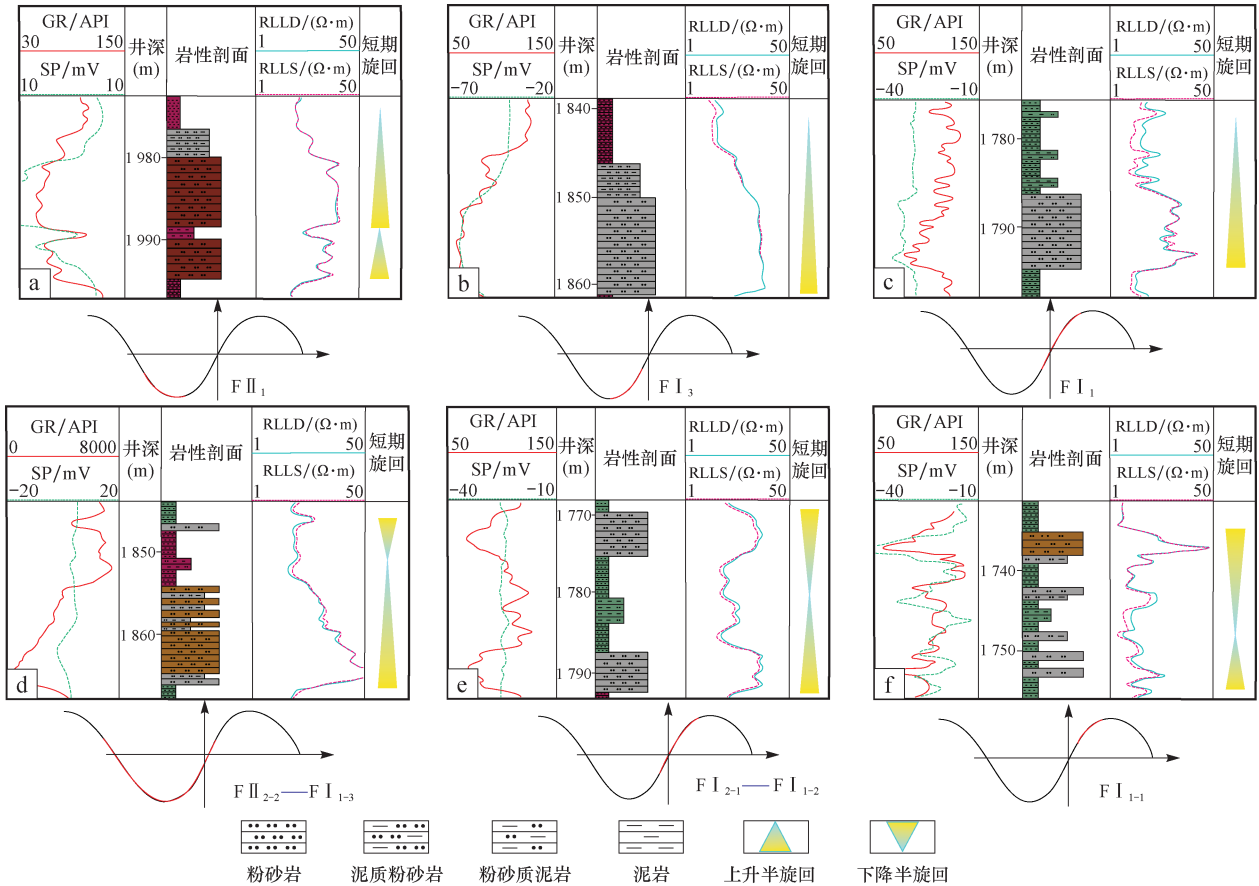


图 3 州 311 地区泉三、泉四段短期基准面旋回发育样式

Fig. 3 The styles of short-term base-level cycles of the 3rd and 4th Members of Quantou Formation in Zhou 311 area

a. 低可容纳空间上“变深”非对称型旋回(A1),肇 412 井;b. 低可容纳空间上“变深”非对称型旋回(A2),州 132 井;c. 高可容纳空间上“变深”非对称型旋回(A3),源 214 井;d. 上升半旋回为主的不完全对称型旋回(C1),肇 412 井;e. 上升和下降半旋回近于相等的对称型(C2),州 132 井;f. 下降半旋回为主的不完全对称型旋回(C3),州 132 井

短期基准面旋回与沉积相发育具有一定的对应关系。州 311 地区主要发育一套河流-浅水三角洲相体系,不同沉积相带发育环境中,基准面的上升和下降在地层沉积过程中具有不同记录,比如不同相标志反应出不同的沉积特点。上升半旋回的沉积微相组合多为曲流河道-冲积平原、分流河道-洪泛沉积、水下分流河道-支流间湾等,代表向上变细的正韵律旋回组成的退积序列;下降半旋回的沉积微相组合多为冲积平原-决口扇、洪泛沉积-决口扇、水下决口扇-水下分流河道等,代表向上变粗的反韵律旋回组成的加积序列。

3.2 层序划分方案

州 311 地区研究重点层段为泉三段、泉四段,青一段底部油页岩底界作为目的层的顶界,在岩性、测井曲线、短期基准面旋回发育样式等基础上,建立了州 311 地区层序地层划分方案(表 1)。

州 311 地井区泉三段划分为 2 个中期旋回 Q3- MSC1—Q3- MSC2,5 个短期旋回 Q3- SSC1—Q3- SSC5。短期旋回逐渐由以上升为主的不完全对称型(C1 型)向不对称型(A1,A2 型)转变,泉三段主要发育一套紫红色泥岩、灰白色粉-细砂岩组成的曲流河和浅水三角洲平原沉积体系;泉四段划分为 3 个中期旋回 Q4- MSC1—Q4- MSC3,7 个短期旋回 Q4- SSC1—Q4- SSC7。短期旋回由不对称型(A)向不完全对称型(C1,C2,C3)转变,泉四段主要为灰绿色、紫红色泥岩、灰白色粉-细砂岩组成的三角洲平原和三角洲前缘沉积体系。

3.2.1 单井层序划分

州 311 井位于州 311 地区中部,泉三段、泉四段总厚度为 153.27 m,井深范围 1 676.78 ~1 830.05 m,其

中,泉三段整体厚度为 62.6 m,泉四段整体厚度为 90.67 m。扶余油层上覆地层为青山口组一段,为前三角洲沉积,测井曲线表现为有尖突高值显示(图 4)。自下而上各中期基准面旋回控制下主要沉积特征如下。

1) Q3- MSC1 沉积期:井深范围在 1 802.35 ~1 830.05 m,是长期基准面旋回下降中期的沉积响应,由 Q3- SSC1 和 Q3- SSC2 两个短期旋回组成。垂向上,Q3- SSC1 时期底界发育一期河道充填,河道砂体厚度约 3.22 m。短期基准面旋回均为以上升为主的不完全对称型结构(C1 型),层序内部发育浅水三角洲平原分流河道、洪泛沉积。

2) Q3- MSC2 沉积期:井深范围在 1 767.45 ~1 802.35m,是长期基准面旋回下降晚期的沉积响应,由 Q3- SSC3,Q3- SSC4 和 Q3- SSC5 三个短期旋回组成。Q3- SSC3 时期为一套紫红色泥岩沉积,短期基准面旋回为以上升为主的不完全对称型结构(C1 型),层序内部发育浅水三角洲平原洪泛沉积。Q3- SSC4 时期底界发育一期河道充填,河道砂体厚度约 2.35 m,且完全油浸呈褐色。Q3- SSC5 时期发育灰白色粉砂岩,夹少量灰绿色泥岩,垂向上发育一期河道充填,河道砂体厚度约 4.63 m。Q3- SSC4—Q3- SSC5 时期,短期基准面旋回为以上升为主的不对称型(A2 型)和不完全对称型(C1,A2 型)结构,层序内部发育曲流河道、冲积平原沉积。

3) Q4- MSC1 沉积期:井深范围在 1 738.85 ~1 767.45 m,是长期基准面旋回上升早期的沉积响应,由 Q4- SSC1 和 Q4- SSC2 两个短期旋回组成。该时期岩性为紫红色泥岩、粉砂质泥岩,以及厚层灰褐色油浸粉砂岩。Q4- SSC1 时期发育一期河道充填,河道砂体厚度约 5.44 m,可见底冲刷构造,具明显正韵律特征,短期基准面旋回为两个上升半旋回组成的不对称

表 1 州 311 地区泉三、泉四段层序划分方案

Table 1 Sequence division scheme of the 3rd and 4th Members of Quantou Formation in Zhou 311 area

短期旋回名称	短期旋回样式	岩性	GR	对应的层位
Q4- SSC7	C3、C2	顶部油页岩,底部砂岩底面或泥岩	平底,相对高值或渐变	F I ₁₋₁
Q4- SSC6	C3、C2	底部砂岩底面或泥岩	平底,相对高值或渐变	F I ₁₋₂
Q4- SSC5	C1、C2	底部砂岩底面或泥岩	平底,相对高值或渐变	F I ₁₋₃
Q4- SSC4	C1	底部砂岩底面或泥岩	平底,相对低值或渐变,相对高值	F I ₂₋₁
Q4- SSC3	C1	底部砂岩底面或泥岩	平底,相对低值或渐变,相对高值	F I ₂₋₂
Q4- SSC2	A1、A2、C1	底部砂岩底面	平底,相对低值	F I ₃₋₁
Q4- SSC1	A1、A2	底部砂岩底面	平底,相对低值	F I ₃₋₂
Q3- SSC5	A1、A2	底部砂岩底面	平底,相对低值	F II ₁₋₁
Q3- SSC4	C1、A1、A2	底部砂岩底面	平底,相对低值	F II ₁₋₂
Q3- SSC3	C1、A2	底部砂岩底面或泥岩	平底,相对高值或渐变	F II ₁₋₃
Q3- SSC2	C1	底部砂岩底面或泥岩	平底,相对高值或渐变	F II ₂₋₁
Q3- SSC1	C1	底部砂岩底面或泥岩	平底,相对低值或渐变,相对高值	F II ₂₋₂

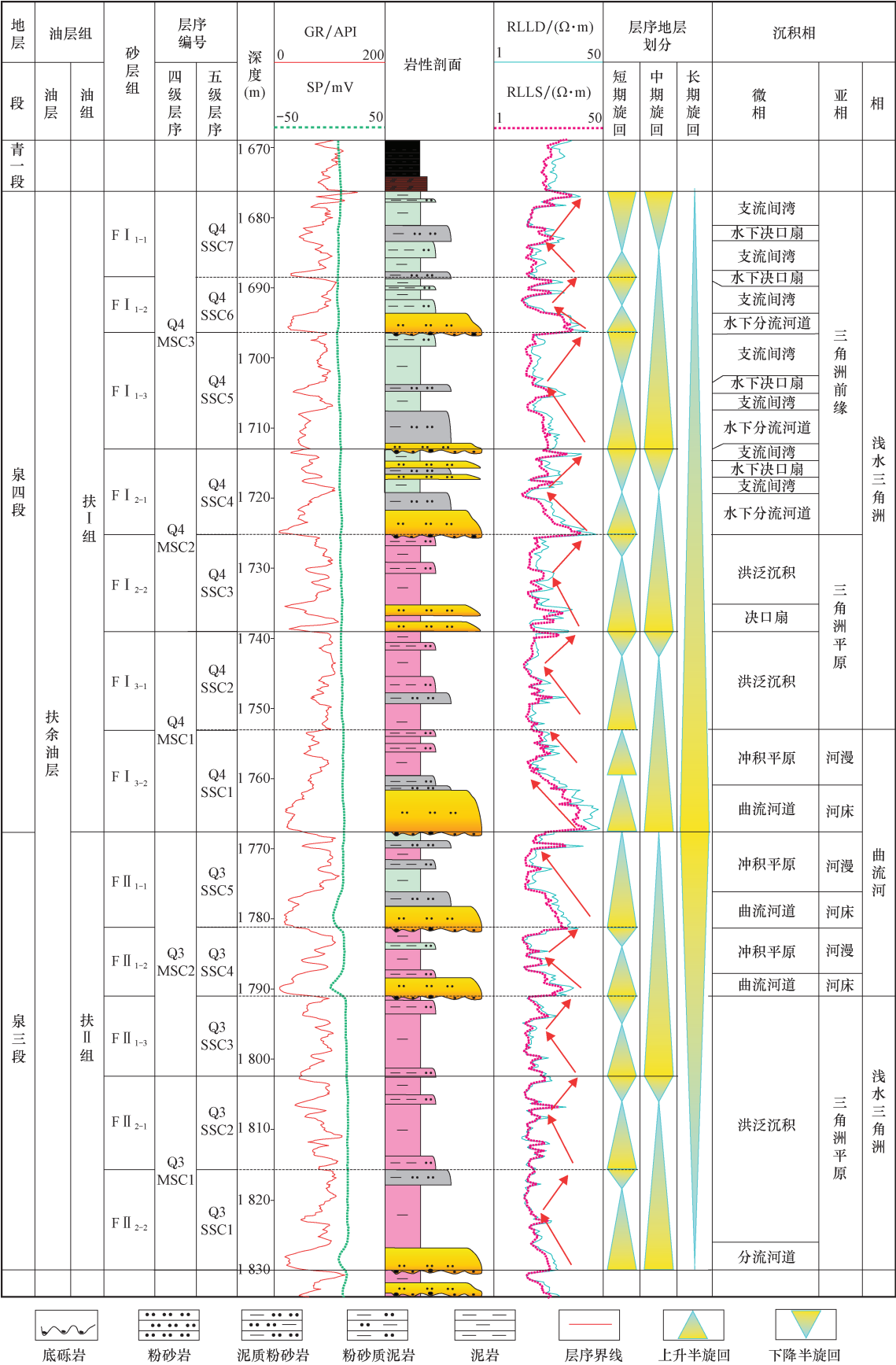


图 4 州 311 地区泉三、泉四段层序地层与沉积相综合柱状剖面(州 311 井)柱状图

Fig. 4 Sequence stratigraphic and sedimentary facies column of the 3rd and 4th Members of Quantou Formation in Zhou 311 area(Well Zhou 311)

型结构(A1型),层序内部发育曲流河道、冲积平原沉积。Q4-SSC2时期短期基准面旋回为以上升为主的不完全对称型(C1型),层序内部发育浅水三角洲平原洪泛沉积。

4) Q4-SSC2沉积期:井深范围在1 721.82~1 738.85 m,是长期基准面旋回上升中期的沉积响应,由Q4-SSC3和Q4-SSC4两个短期旋回组成。该时期岩性为薄层粉砂岩与紫红色泥岩互层、褐色油浸粉砂岩。Q4-SSC3时期短期基准面旋回为以上升为主的不完全对称型结构(C1型),层序内部发育浅水三角洲平原亚相及洪泛沉积和决口扇微相。Q4-SSC4时期垂向上发育一期河道冲刷,河道砂体厚度约6.05 m,正韵律特征明显,短期基准面旋回近完全对称型结构(C2型),层序内部发育浅水三角洲前缘亚相、支流间湾、水下决口扇和水下分流河道微相。

5) Q4-SSC3沉积期:井深范围在1 676.78~1 712.82 m,是长期基准面旋回上升晚期的沉积响应,由Q4-SSC5、Q4-SSC6和Q4-SSC7三个短期旋回组成。该时期岩性为灰绿色泥岩,底界为灰色泥质粉砂岩、褐色油浸粉砂岩。Q4-SSC5和Q4-SSC6时期垂向上均发育一期河道充填,河道砂体厚度分别约为5.42 m和2.62 m,短期基准面旋回为近完全对称型结构(C2型)。Q4-SSC7时期为灰绿色泥岩沉积,短期基准面旋回为以下降为主的不完全对称型结构(C3型)。该时期层序内部发育浅水三角洲前缘亚相,以及水下分流河道、支流间湾、水下决口扇微相。

垂向上,总体表现为长期基准面旋回由上升—下降—上升的演化过程。短期基准面旋回界面上分布广泛的河道砂岩,发育河道底冲刷构造,具明显正韵律特征,界面下部分布古土壤层,为区域性暴露不整合层序界面标志。其中Q4-SSC1和Q3-SSC5时期河道砂体普遍油浸,且连续沉积厚度较大,属于最有利的砂体发育层位。

3.2.2 连井层序地层格架

为了研究储层砂体的垂向发育特征,根据高分辨率层序地层短期基准面旋回等时对比法则,结合任双坡等(2016)对单砂体发育类型和几何样式的研究^[13],选定东西向垂直物源方向连井剖面进行层序地层对比和砂体分布解剖,并建立泉三段、泉四段地层对比格架。

图5所示连井剖面呈东西向展布,顶、底界面相对明显,中、短期层序发育完整,具良好岩电对应关

系。研究区不同地区沉积相对稳定,地层厚度在横向上变化不大,垂向上Q3-SSC5、Q4-SSC1和Q4-SSC3时期砂体发育较好,砂体连通性较好,垂直于物源方向砂体呈透镜状展布,单层砂岩厚度最大可达8.38 m。

综上所述,基准面的上升和下降影响A/S(可容空间/沉积物供给量)值的变化,进而对河道砂体发育类型和几何形态分布特征产生影响^[14](图6)。河道砂体在垂向上的演化受到A/S比值的控制,从东西向连井大剖面可以看出,整个泉三段、泉四段发育多级沉积旋回,反映了A/S值纵向上Q3-SSC1—Q4-SSC7经历了多级变化发育阶段。研究区垂向上表现为基准面由高到低再到高的演变规律,发育分流河道—曲流河道—分流河道—水下分流河道纵向沉积演化序列,河道砂体发育类型从较少叠置转变为较多垂向或侧向叠置型逐渐过渡到孤立型。

4 储层砂体及旋回结构特征

4.1 储层砂体类型及特征

松辽盆地北部白垩系泉头组开发实践表明,许多薄砂层构成主力油层,其平面展布变化大。单层砂岩厚度薄,厚度在2~13 m。州311地区泉三段、泉四段典型沉积微相砂体分为曲流河道砂体、分流河道砂体以及水下分流河道砂体3种类型。

4.1.1 曲流河道砂体

曲流河道砂体发育在河床亚相中,沉积水体能量高,砂体沉积厚度多为4~11 m,研究区最厚可达13 m。沉积物沉积速率快,粒度较粗,岩性为灰白色粉—细砂岩,局部油浸呈褐色,层理发育复杂且规模大,底部可见底冲刷构造,因河床滞留而发育粒径较大的底砾岩(2~5 mm)(图7a)。

垂向上,可见明显粒度向上变细的正韵律特征,具有典型的曲流河“二元结构”特征^[15]。岩相组合规律:发育底部滞留沉积砾岩相—板状交错层理细砂岩相—块状层理粉、细砂岩相—大型槽状交错层理粉砂岩—平行层理粉砂岩—生物扰动构造粉砂岩—波状层理泥质粉砂岩相—钙质结核泥岩相组成。向上为基准面—上升的演化过程,代表沉积序列为向上变细的正韵律旋回组成的退积序列,GR曲线多为箱形。

4.1.2 分流河道砂体

分流河道砂体发育在浅水三角洲平原亚相中,沉

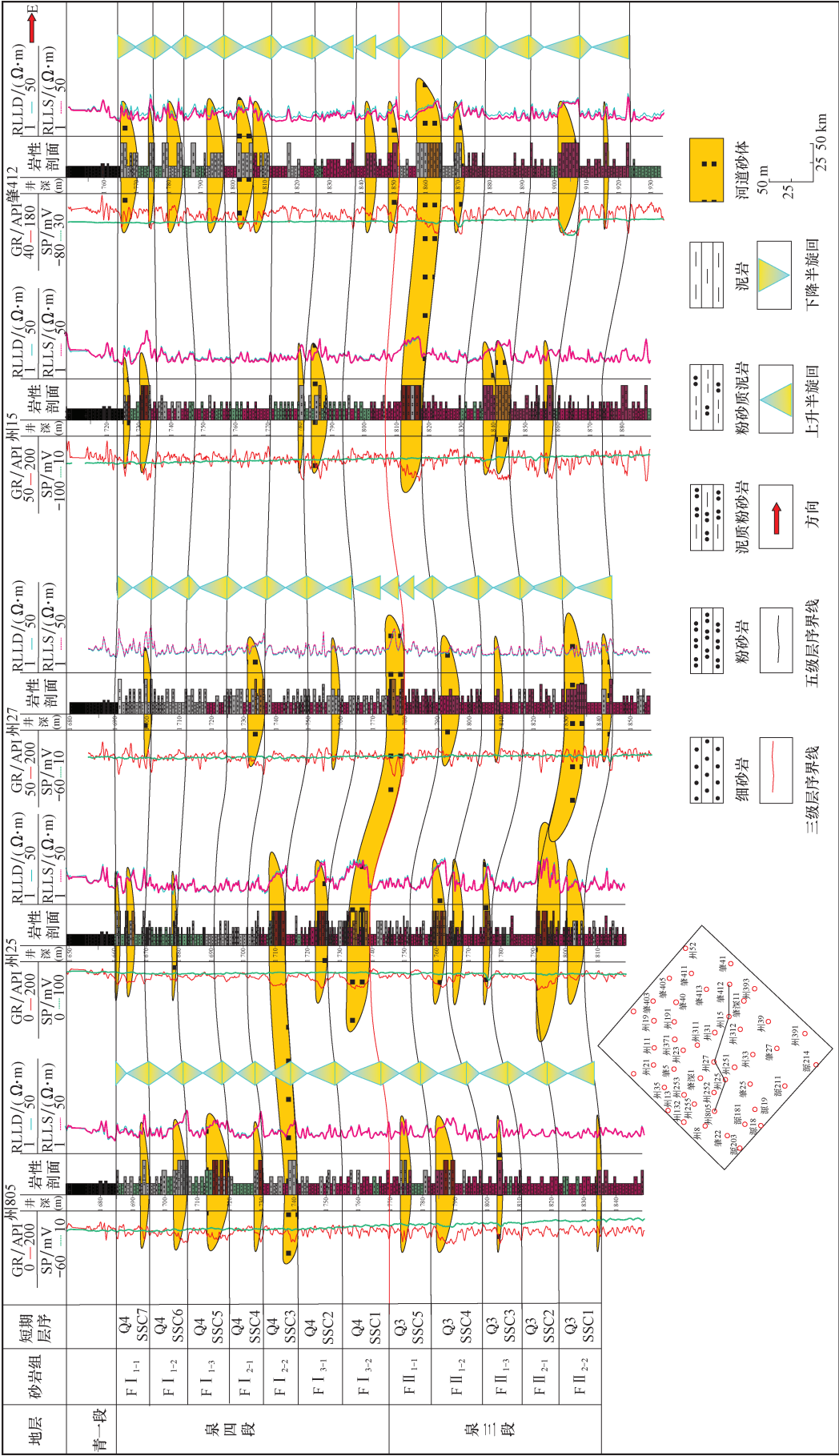


图5 州311地区短期基准面旋回控制下砂体分布连井剖面
Fig.5 Correlation of sand bodies under the control of the short-term base-level cycle in Zhou 311 area

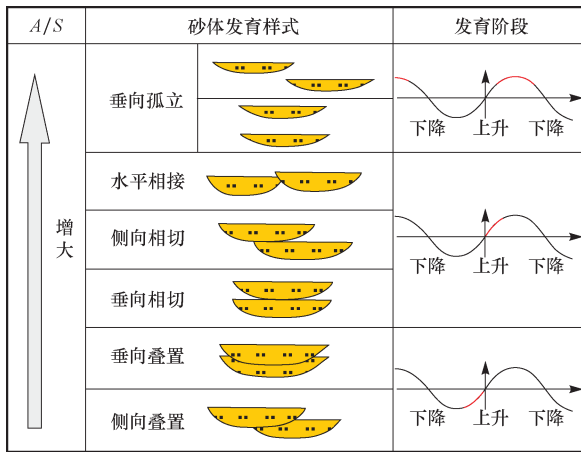


图6 州311地区泉三、泉四段A/S值控制下河道砂体发育样式

Fig. 6 Types of channel sand bodies under the control of A/S value of the 3rd and 4th Members of Quantou Formation in Zhou 311 area

积水体能量较高,砂体沉积厚度均为2.5~8.9 m,研究区最厚可达9.8 m。岩性为灰白色粉砂岩,局部油浸呈黑褐色,底部可见底砾岩,大小在1~3 mm(图7b)。

垂向上,分流河道由多个正韵律叠置组合而成,多期河道冲刷,叠置河道沉积厚度较大^[16]。岩相组合规律:发育底冲刷构造砾岩相—大型槽状交错层理粉、细砂岩相—块状层理粉砂岩相—槽状交错层理粉砂岩相—波状层理泥质粉砂岩相—小型槽状交错层理粉砂岩相—生物扰动、爬升层理泥质粉砂岩相—钙质结核紫红色泥岩相。向上表现为多级上升半旋回叠置组合而成的多期基准面上升的演化过程,代表沉积序列为多个向上变细的正韵律旋回组成的退积序列,GR曲线形态多为钟形,少量为箱形。

4.1.3 水下分流河道砂体

水下分流河道发育在浅水三角洲前缘亚相中,沉

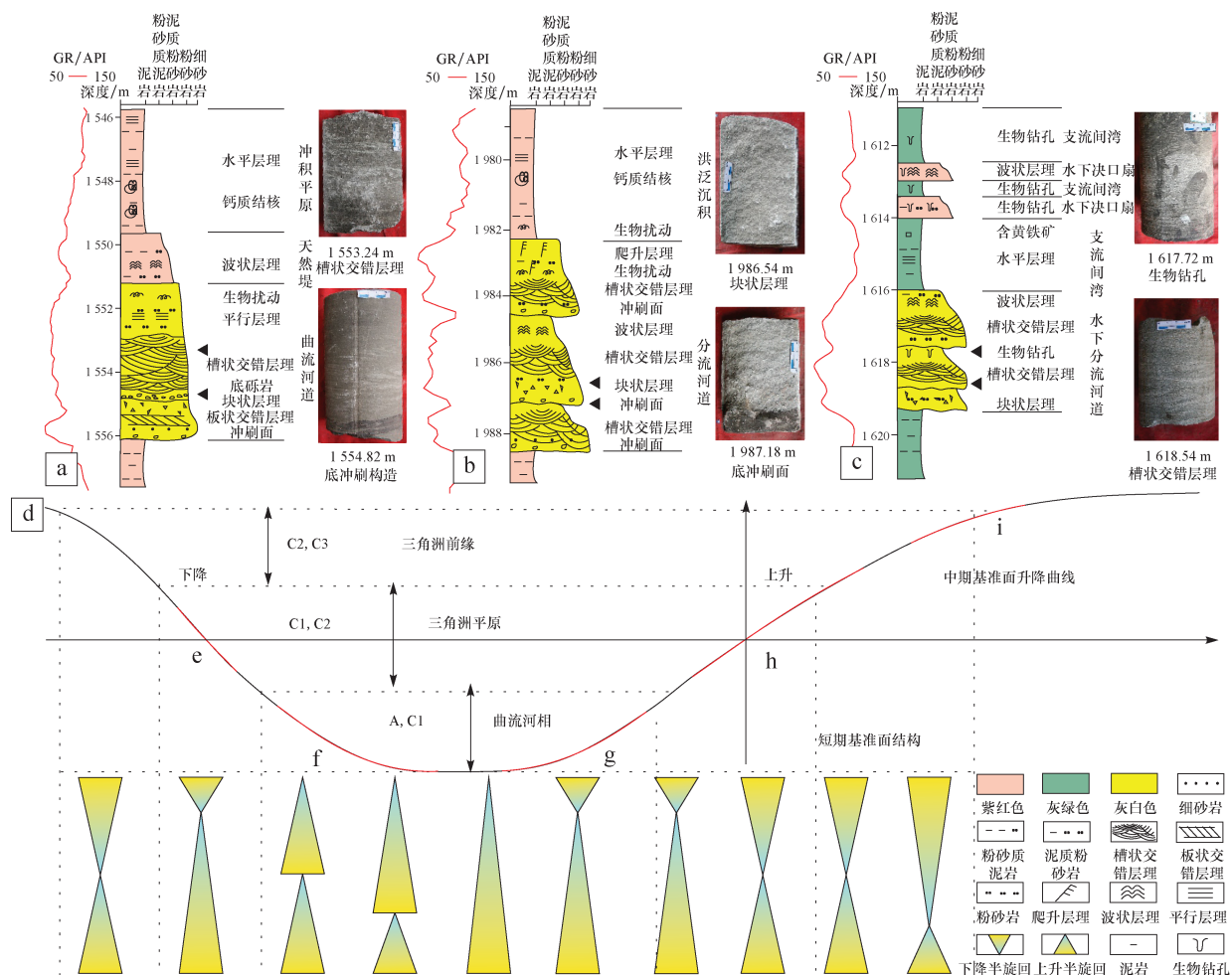


图7 州311地区泉三段、泉四段基准面旋回控制下储层砂体发育类型及特征

Fig. 7 Types and characteristics of reservoir sand bodies under the control of base-level cycle of the 3rd and 4th members of Quantou Formation in Zhou 311 area

a. 曲流河道沉积剖面,源152井;b. 三角洲平原分流河道沉积剖面,州52井;c. 三角洲水下分流河道沉积剖面,源15井;
d. 基准面旋回结构与沉积相对应关系

积水体能量相对较低,砂体沉积厚度多为2.1~5.6 m。岩性为灰白色粉砂岩,向上为粒度变细的泥质沉积,底部可见冲刷面,底砾岩相对不发育(图7c)。

垂向上,水下分流河道由多个孤立的正韵律沉积组合而成,每个正韵律均反映沉积水体能量逐渐减弱的沉积过程,河道单层砂体厚度薄,泥质含量高^[17-18]。岩相组合规律:发育块状层理粉砂岩相—小型交错层理粉砂岩相—波状层理泥质粉砂岩相—含黄铁矿灰绿色泥岩相。向上为基准面升降对应的地层沉积厚度不大,GR曲线形态多为钟形。

4.1.4 基准面旋回控制下砂体发育规律

根据以上旋回结构与沉积相、测井曲线对应关系(图4),结合郑荣才等(2000)对短期基准面旋回组合样式的沉积动力学研究理论^[19],认为短期基准面旋回发育样式反映岩性、测井曲线、沉积相发育序列和组合特征,同时短期基准面旋回样式对应河道砂体的发育不同类型(图7)。

基准面升降直接影响砂体的沉积发育及旋回的发育级次,根据基准面升降和A(可容纳空间)值增减速率变化规律,中期旋回发育过程分为加速下降(e)、缓慢下降到最低点再缓慢上升(f—g)、快速上升再缓慢上升到最高(h—i)3个阶段,各个阶段短期旋回呈现不同的叠置样式并指示不同河道砂体发育特征。

加速下降a阶段和快速上升d阶段短期基准面旋回发育以上升半旋回为主的不完全对称型或近完全对称型(C1,C2型),该阶段在研究区以发育浅水三角洲平原沉积为主,分流河道砂体十分发育;f—g阶段短期基准面旋回发育向上“变深”的不对称型(A,C1型),该阶段为典型的曲流河相沉积,储集砂体为曲流河道砂体;h—i阶段短期基准面旋回发育以下降半旋回为主的不完全对称型或近完全对称型(C2,C3型),该阶段在研究区以发育水下浅水三角洲前缘沉积为主,砂体类型主要为水下分流河道砂体。各个演化阶段A值由大变小(e—f)再由小变大(g—i),沉积过程中水体携带能量、搬运沉积物的速率、总量和粒度呈低而细变为高而粗,再次复递变为低而细的流体沉积动力学演变过程,因而在发育过程中出现由高A值向低A值转化后,重返高A值的退积—加积—进积—加积—退积的地层沉积响应序列。

4.2 储层砂体沉积旋回及特征

研究区储层砂体多为复合式河道砂体,从测井曲

线上识别为一套箱形厚层砂岩体,内部无明显泥质夹层,但是从取心井段的现场观察可见多个单砂体组合的叠置河道样式,其中,垂向上,每个单砂体为正粒序,内部连续沉积,均反映一次河道冲刷充填,底部均发育冲刷面,局部可见泥砾^[20-21]。下面选取典型取心井对研究区不同类型河道砂体沉积旋回进行解析。

4.2.1 曲流河道砂体沉积旋回

以肇412井Q3—SSC5时期为例,取心段1 857.37~1 865.47 m,沉积一套8.1 m的曲流河道(图8a)。以细砾岩、细砂岩、粉砂岩沉积为主,在测井曲线上可划为2次河道沉积,但经精细岩心观察识别出8次河道充填,沉积厚度依次为:①沉积厚度1.24 m;②沉积厚度0.87 m;③沉积厚度1.37 m;④沉积厚度1.12 m;⑤沉积厚度0.84 m;⑥沉积厚度0.82 m;⑦沉积厚度0.86 m;⑧沉积厚度1.01 m。

4.2.2 分流河道砂体沉积旋回

以州132井Q3—SSC2时期为例,取心段1 835.37~1 839.97 m,沉积一套4.6 m的分流河道(图8b)。岩性以粉砂岩为主,较曲流河道细,GR曲线明显可见二次回返,反映出2次河道充填,但是从岩心观察上识别出5次河道充填,沉积厚度依次为:①沉积厚度1.32 m;②沉积厚度1.09 m;③沉积厚度0.75 m;④沉积厚度0.42 m;⑤沉积厚度1.02 m。

4.2.3 水下分流河道砂体沉积旋回

以源214井Q4—SSC6时期为例,取心段1 644.38~1 647.62 m,沉积一套3.34 m水下分流河道(图8c)。水下分流河道砂体粒度最细,以粉砂岩、泥质粉砂岩为主,上下与灰绿色泥岩接触,测井曲线上明显为一单砂体沉积,但是从岩心观察上识别出4次河道充填,沉积厚度依次为:①沉积厚度1.3 m;②沉积厚度0.58 m;③沉积厚度0.94 m;④沉积厚度0.52 m。

根据以上述不同沉积微相复合砂体内部旋回特征研究方法,对研究区其他取心井不同类型砂体进行统计,研究认为:①3种类型复合式河道砂体的沉积旋回发育次数与砂体厚度成正相关关系;②曲流河道砂体发育3~10次沉积旋回,分流河道砂体发育3~6次沉积旋回,水下分流河道砂体发育3~5次沉积旋回。利用对取心井段的现场岩心观察,划分出不同河道砂体沉积旋回次数与测井曲线上反映出的旋回特征进行对比,建立对应关系与规律(图9),为进一步的掌握研究区其他非取心井的储层砂体沉积旋回发育特征提供依据。

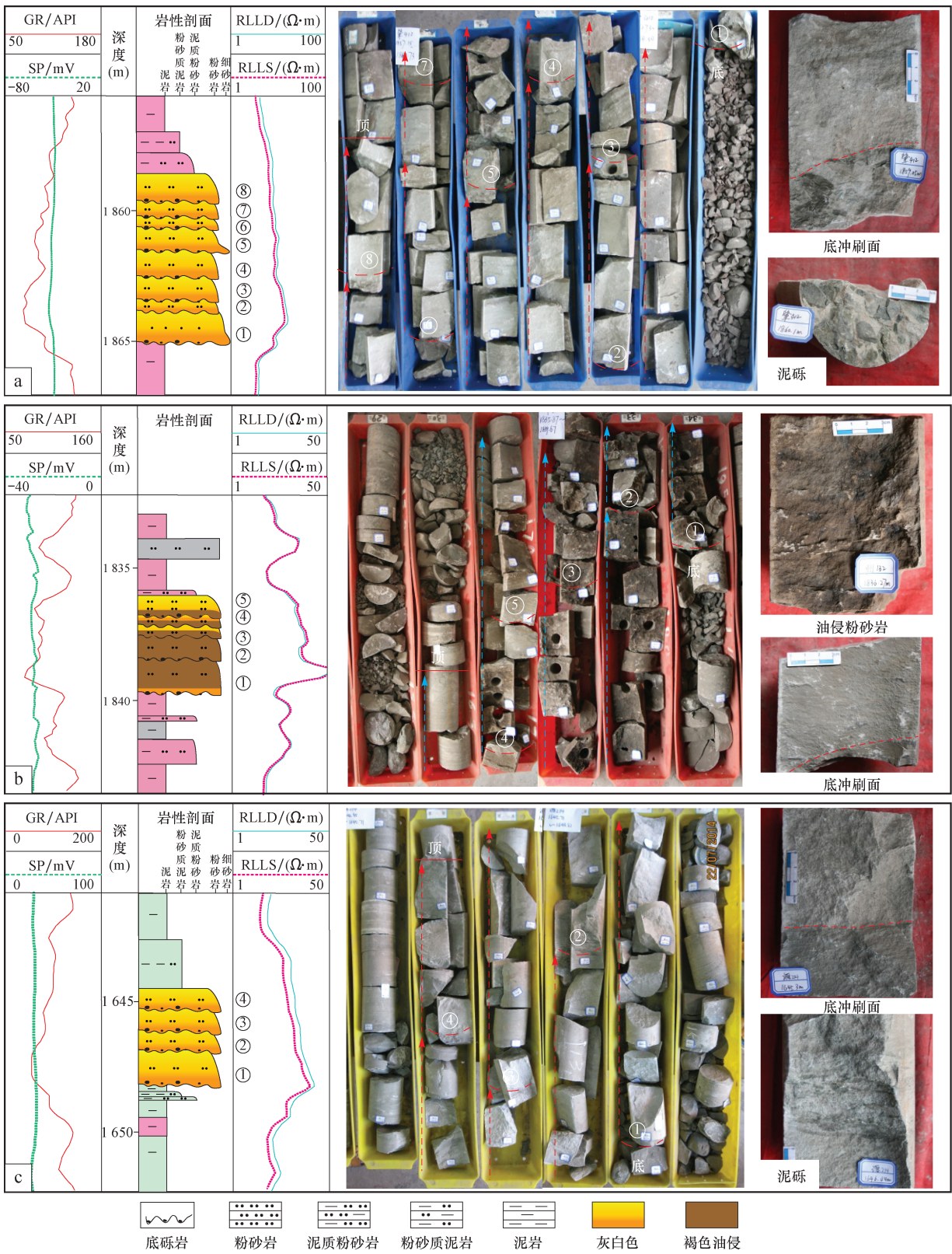


图 8 州 311 地区泉三、泉四段储层砂体内部沉积旋回

Fig. 8 Sedimentary cycle within reservoir sand bodies of the 3rd and 4th members of Quantou Formation in Zhou 311 area

a. 曲流河道沉积旋回结构与取心段旋回界面特征, 肇 412 井; b. 三角洲平原前分流河道沉积旋回结构与取心段旋回界面特征, 州 132 井;

c. 三角洲前缘水下分流河道沉积旋回结构与取心段旋回界面特征, 源 214 井

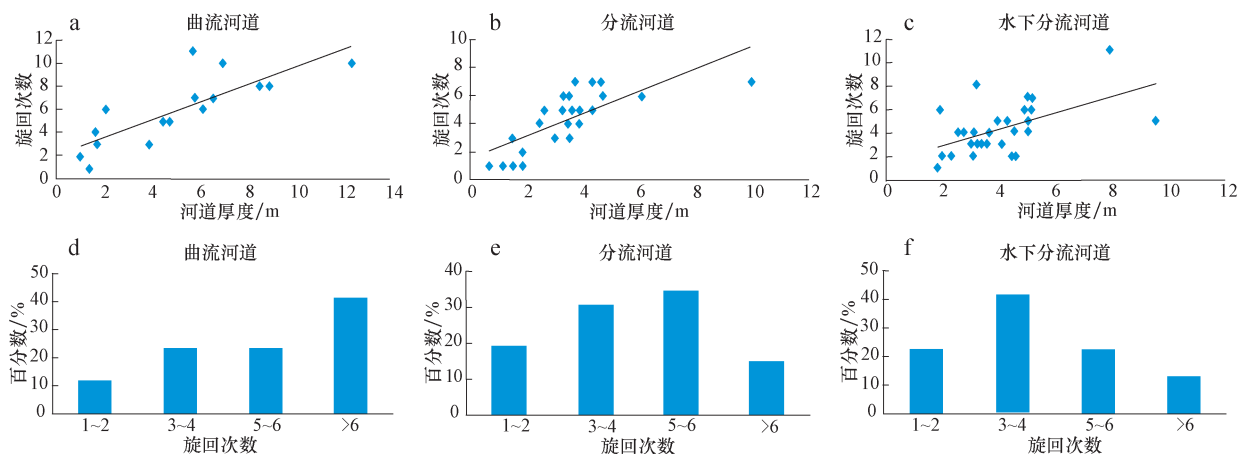


图9 州311地区取心段不同类型砂体内部沉积旋回特征

Fig. 9 Sedimentary cycle characteristics of cores within different types of sand bodies in Zhou 311 area

a—c. 不同河道砂体沉积厚度与旋回次数曲线;d—f. 不同河道砂体旋回次数百分比

5 结论

1) 州311地区泉三段、泉四段高分辨率层序界面识别标志:①青一段底部有3套油页岩,其中第二套油页岩区域分布稳定,作为三级层序湖泛面对比标志层;②泉四段与青一段之间呈整合接触岩性-电性突变面,测井曲线上为箱形、钟形的下部突变处;③泉三段/泉四段界面处,界面之上为分布较为广泛的河道砂岩,发育河道底冲刷构造,界面之下分布广泛的古土壤层,为区域性暴露不整合层序界面标志。

2) 州311地区泉三段划分为2个中期旋回(Q3-MS1—Q3-MS2)和5个短期基准面旋回(Q3-SS1—Q3-SS5),短期基准面由以上升为主的不完全对称型(C1)向不对称性型(A1、A2)转变。泉四段划分为3个中期旋回(Q4-MS1—Q4-MS3)和7个短期旋回(Q4-SS1—Q4-SS7),短期基准面旋回发育不对称型(A)向不完全对称型(C1、C2、C3)转变。

3) 曲流河相中,主要发育向上“变深”的不对称型旋回(A、C1型),储集砂体为曲流河道砂体;三角洲平原亚相中,主要发育以上升半旋回为主的不完全或近完全对称型旋回(C1、C2型),储集砂体为分流河道砂体;三角洲前缘亚相中,主要发育以下降半旋回为主的不完全或近完全-完全对称型旋回(C2、C3型),储集砂体为水下分流河道砂体。研究区整体发育由高A(可容纳空间)值向低A值转化后,重返高A值的退积—加积—进积—加积—退积的地层沉积响应序列。

4) 州311地区发育3种类型复合式河道砂体:

①曲流河道砂体主要为细、粉砂岩沉积,发育槽状、板状、平行层理等大规模复杂层理构造,砂体规模发育较大,其内部沉积旋回期次多为3~10次;②分流河道砂体主要为粉砂岩沉积,主要发育小型槽状、板状层理,其内部沉积旋回期次多为3~6次;③水下分流河道主要为粉砂岩、泥质粉砂岩沉积,层理规模小,其内部旋回期次多为3~5次。

参考文献

- [1] Vail P R, Michum R M, Thonon S. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part3: Relative changes of sea level form coastal onlap [C]. AAPG Memoir 26, 1977, 63-82.
- [2] Cross T A. High resolution stratigraphic correlation from the perspective of base-level cycles and sediment accommodation [C] // Proceedings of Northwestern European Sequence Stratigraphy Congress, 1994, 105-123.
- [3] 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派——高分辨率层序地层学[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 89-97.
Deng Hongwen. A new school of thought in sequence stratigraphic studies in U. S.; high-resolution sequence stratigraphy [J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(2): 89-97.
- [4] 郑荣才, 吴朝容, 叶茂才. 浅谈陆相盆地高分辨率层序地层研究思路[J]. 成都理工学院学报, 2000, 27(3): 241-244.
Zheng Rongcai, Wu Chaorong, Ye Maocai. Research thinking of high-resolution sequence stratigraphy about a terrigenous basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2000, 27(3): 241-244.
- [5] 魏魁生, 徐怀大, 叶淑芬. 松辽盆地白垩系高分辨率层序地层格架[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(1): 7-14.
Wei Kuisheng, Xu Huaida, Ye Shufen. High resolution sequence stratigraphic framework in cretaceous, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 1997, 18(1): 7-14.
- [6] 郭少斌, 孙少波. 松辽盆地层序地层学研究新认识[J]. 岩相古地理, 1998, 18(1): 54-60.

- Guo Shaobin, Sun Shaobo. Recent progress in sequence stratigraphy of the Songliao Basin in northeastern China[J]. *Sedimentary Facies and Palaeogeography*, 1998, 18(1): 54–60.
- [7] 李群. 松辽盆地长岭凹陷隐蔽油气藏勘探研究[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27(6): 770–774.
- Li Qun. Study of subtle oil/gas reservoirs exploration in Changling Sag of Songliao Basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(6): 770–774.
- [8] 邓宏文, 吴海波. 河流相层序地层划分方法——以松辽盆地白垩统扶余油层为例[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(5): 621–628.
- Deng Hongwen, Wu Haibo. Division of fluvial sequence stratigraphy—an example from the Lower Cretaceous Fuyu oil-bearing layer, the Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(5): 621–628.
- [9] 邓庆杰, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 浅水三角洲分流河道砂体沉积特征——以松辽盆地三肇凹陷扶 II - I 组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 118–127.
- Deng Qingjie, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water delta distributary channel sand bodies; a case from II - I Formation of Fuyu oil layer in the Sanzhao Depression, Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 118–127.
- [10] 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.
- [11] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 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[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.
- [12] 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. *沉积学报*, 2001, 19(2): 249–255.
- Zheng Rongcai, Peng Jun, Wu Chaorong. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 249–255.
- [13] 任双坡, 姚光庆, 毛文静. 三角洲前缘水下分流河道薄层单砂体成因类型及其叠置模式——以古城油田泌浅 10 区核三段 IV - VI 油组为例[J]. *沉积学报*, 2016, 34(3): 582–593.
- Ren Shuangpo, Yao Guangping, Mao Wenjing. Genetic types and superimposition patterns of subaqueous distributary channel thin sandbodies in delta front: A case study from the IV—VI reservoir groups of H3 in Biquan 10 area of Gucheng oilfield[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(3): 582–593.
- [14] 田景春, 张兴良, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地高桥地区上古生界储集砂体叠置关系及分布定量刻画[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(6): 737–742.
- Tian Jingchun, Zhang Xingliang, Wang Feng, et al. Quantitative characterization of superimposition relationship and distribution of reservoir sandbodies in the Upper Palaeozoic of Gaoqiao region, the Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(6): 737–742.
- [15] 郑荣才, 柯光明, 文国华, 等. 高分辨率层序分析在河流相砂体等时对比中的应用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2004, 31(6): 641–647.
- Zheng Rongcai, Ke Guangming, Wen Guohua. Isochronic correlation of fluvial sandbodies by high-resolution sequence technique[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2004, 31(6): 641–647.
- [16] 封从军, 鲍志东, 单启铜, 等. 三角洲平原复合分流河道内部单砂体划分——以扶余油田中区南部泉头组四段为例[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(1): 77–83.
- Feng Congjun, Bao Zhidong, Shan Qitong, et al. Single sand body identification in compound distributary channel of delta plain: a case study from the fourth member of Quantou Formation in the southern part of central Fuyu oilfield[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(1): 77–83.
- [17] 李志鹏, 林承焰, 董波, 等. 河控三角洲水下分流河道砂体内部建筑结构模式[J]. *石油学报*, 2012, 33(1): 1–3.
- Li Zhipeng, Lin Chengyan, Dong Bo, et al. An internal structure model of subaqueous distributary channel sands of the fluvial-dominated delta[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(1): 1–3.
- [18] 蔡全升, 胡明毅, 胡忠贵, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(6): 903–914.
- Cai Quansheng, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. 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[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(6): 903–914.
- [19] 郑荣才, 尹世民, 彭军. 基准面旋回结构与叠加样式的沉积动力学分析[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 369–375.
- Zheng Rongcai, Yin Shiming, Peng Jun. Sedimentary Dynamic Analysis of Sequence Structure and Stacking Pattern of Base-Level Cycle[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 369–375.
- [20] 谭先锋, 蒋艳霞, 李洁, 等. 济阳坳陷古近系孔店组高频韵律旋回沉积记录及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 51–72.
- Tan Xianfeng, Jiang Yanxia, Li Jie, et al. Sedimentary record and origin of high frequency cycles in the Paleogene Kongdian Formation in the Jiyang Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 51–72.
- [21] 封从军, 鲍志东, 张吉辉, 等. 扶余油田中区泉四段基准面旋回划分及对单砂体的控制[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(2): 62–68.
- Feng Congjun, Bao Zhidong, Zhang Jihui, et al. Dividing of base-level cycle and its Controlling on single sand Body in the Fourth Member of Quantou Formation in Fuyu Oilfield[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(2): 62–68.