第 27 卷 第 5 期
2025 年 10 月

古 地 理 学 报
JOURNAL OF PALAEOGEOGRAPHY（Chinese Edition）

Vol. 27 No. 5
Oct. 2025

文章编号：1671-1505(2025)05-1207-20 **DOI**:10.7605/gdlxb.2025.076

松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层浅水曲流河三角洲沉积与演化特征*

崔映坤[1,2] 鲍志东[1,2] 李忠诚[3] 赵家宏[3] 姜福杰[1,2]
王天煦[3] 韩昊天[3] 姜振昌[3] 王腾宇[1,2]

1 中国石油大学（北京）地球科学学院，北京 102249
2 油气资源与工程全国重点实验室，中国石油大学（北京），北京 102249
3 中国石油吉林油田分公司勘探开发研究院，吉林松原 138000

摘 要 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层发育浅水曲流河三角洲沉积体系，具有重要的油气勘探价值。基于岩心、测录井和岩石矿物资料，优选 INPEFA 技术和色度指数建立扶余油层高精度层序地层格架，通过岩石学特征、砂体成因序列及测井相等，明确其沉积相类型，分析层序格架下三角洲砂体时空演化特征。结果表明：扶余油层整体形成于水进背景，期间伴随基准面的高频升降，共划分为 4 个四级层序（中期旋回；MSC1-MSC4）、13 个五级层序（短期旋回；SSC1-SSC13）。SSC1-SSC6 以水退为主，伴随短期基准面高频振荡，三角洲平原分流河道由高弯曲窄条带状演变为稳定网状，形成多期间歇叠置的河道砂体结构；SSC7-SSC12 以水进为主，三角洲平原逐渐过渡为外前缘，水下分流河道砂体呈现侧向加积—孤立薄层条带，河口坝发育；SSC13 以水退为主，发育连续分布的水下分流河道和席状砂体。研究认为，高频基准面升降控制了研究区内浅水三角洲砂体的垂向演化与平面分布，基准面高频振荡驱动的多期砂体叠置序列、分流河道砂体的高连续性和空间连通性，共同控制了优质厚层储集层的形成。本研究为浅水曲流河三角洲油气储集层预测提供了新的地质依据，对松辽盆地扶余油层勘探开发具有一定指导意义。

关键词 浅水曲流河三角洲 沉积特征 沉积演化 层序地层 扶余油层 松辽盆地

第一作者简介 崔映坤，女，1998 年生，博士研究生，现主要从事非常规油气地质工程研究。E-mail：1819863687@qq.com。

通讯作者简介 鲍志东，男，1964 年生，教授，博士生导师，主要从事储层地质与油藏描述、沉积学与岩相古地理研究。E-mail：baozd@cup.edu.cn。

中图分类号：P512.2 **文献标志码**：A

Sedimentary characteristics and evolution of shallow-water meandering river delta in Fuyu oil layer, southern Fuxin uplift zone, Songliao Basin

CUI Yingkun[1,2] BAO Zhidong[1,2] LI Zhongcheng[3] ZHAO Jiahong[3] JIANG Fujie[1,2]
WANG Tianxu[3] HAN Haotian[3] JIANG Zhenchang[3] WANG Tengyu[1,2]

1 *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*
2 *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing* 102249, *China*

* 中国石油天然气股份有限公司吉林油田分公司（勘探开发研究院）项目（编号：JLYT-YJY-2022-FW-074）资助。[Financially supported by PetroChina Jilin Oilfield Branch (Exploration and Development Research Institute) Project (No. JLYT-YJY-2022-FW-074)]

收稿日期：2025-01-05 改回日期：2025-03-25

3 *Exploration and Development Research Institute*, *Jilin Oilfield Company*, *PetroChina*, *Jilin Songyuan* 138000, *China*

Abstract The southern Fuxin Uplift Belt in the Songliao Basin hosts a shallow-water meandering river delta sedimentary system within the Fuyu oil layer, holding significant hydrocarbon exploration potential. This study establishes a high-resolution sequence stratigraphic framework for the Fuyu oil layer through integrated application of INPEFA technique and chromaticity indices, integrated with core descriptions, well logs, and petrological analyses. Sedimentary facies types were identified through petrological characteristics, sandbody genetic sequences, and well-log facies, enabling systematic analysis of spatiotemporal evolution patterns of deltaic sandbodies within the sequence framework. Results indicate that the Fuyu oil layer formed during a transgressive background with high-frequency base-level fluctuations, comprising four fourth-order sequences (medium-term cycles MSC1-MSC4) and 13 fifth-order sequences (short-term cycles SSC1-SSC13). SSC1-SSC6 exhibited regressive tendencies with high-frequency base-level oscillations, during which delta plain distributary channels evolved from high-sinuosity narrow ribbons to stable anastomosing networks, forming multi-phase vertically stacked channel complexes. SSC7-SSC12 transitioned to transgressive dominance, with delta plains gradually transforming into delta outer front environments where subaqueous distributary channels exhibited lateral accretion and isolated thin ribbons, accompanied by well-developed mouth bars. SSC13 returned to regression, characterized by continuously distributed subaqueous distributary channels and sheet sands. The study reveals that high-frequency base-level fluctuations controlled vertical evolution and planar distribution of shallow-water delta sandbodies. Multi-phase stacking of channel sandbodies driven by base-level oscillations, together with the high continuity and spatial connectivity of distributary channels, jointly governed the formation of thick, sand-rich reservoirs. This research provides novel geological insights for predicting hydrocarbon reservoirs in shallow-water meandering river deltas, offering practical guidance for exploration and development of the Fuyu oil layer in the Songliao Basin.

Key words shallow meandering river delta, sedimentary characteristics, sedimentary evolution, sequence stratigraphy, Fuyu oil layer, Songliao Basin

About the first author CUI Yingkun, born in 1998, is a Ph.D. candidate at the China University of Petroleum (Beijing). She is mainly engaged in the unconventional oil and gas geological engineering. E-mail: 1819863687@qq.com.

About the corresponding author BAO Zhidong, born in 1964, is a professor and supervisor of the Ph.D. candidate. He is mainly engaged in reservoir geology and reservoir description, sedimentology and lithofacies palaeogeography. E-mail: baozd@cup.edu.cn.

0 引言

浅水三角洲多形成于陆相湖泊环境，常作为优质储集层并饱含油气资源而备受国内外学者的关注(Lemons and Chan, 1999; 邹才能等, 2008; 朱筱敏等, 2013; Reynolds, 2022)。近年来，中国在松辽盆地、鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地等的古生代—中生代多套地层陆续发现了浅水三角洲沉积，并实现了油气勘探突破(朱筱敏等, 2012, 2013; 孙靖等, 2016; 易定红等, 2024)。但是，前人研究多关注于浅水辫状河三角洲沉积体系，包括其沉积演化规律、沉积模式、砂体构型等(王家豪等, 2004; 张义娜等, 2011; 徐蒙等, 2013; 冯晗等, 2023)。而浅水曲流河三角洲通常也可形成良好的油气储集空间，同样具备广阔的勘探前景，但鲜有学者针对以上因素对其进行讨论。在对其开展研究过程中，学者们多利用露头分析、现代沉积观察、地震资料、数值模拟等方法，分析浅水曲流河三角洲发育沉积微相类型、研究各微相

发育和保存程度以及沉积学特征（曾洪流等，2015；冯文杰等，2017；朱茂等，2017；曹军等，2024）。但是，如何恢复浅水曲流河三角洲体系中的高频基准面升降变化并建立高精度等时地层格架，以及高频基准面变化如何影响三角洲的时空演化和控制三角洲砂体的发育还有待研究。

松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层（即白垩系泉头组四段）与其下伏杨大城子油层同为扶余油田主力产油层段，二者发育大规模辫状河—曲流河—浅水三角洲沉积体系（楼章华等，1997；陈少军等，2006；孙雨等，2012；朱筱敏等，2012）。扶余油层沉积时期，扶新隆起带物源主要来自于西南通榆和保康水系、东南长春和怀德水系（孙雨等，2012），为大型拗陷期沉积，具有基底稳定沉降、盆广坡缓、古气候干旱炎热、湖平面频繁波动等特征（朱筱敏等，2012），有利于浅水三角洲的形成。前人对扶余油层的沉积特征、沉积演化与模式做了多方面的研究（张庆国等，2007；梁昌国等，2008；胡明毅等，2009；孙雨等，2012），张庆国等（2007）依据树枝状分叉的分流河道形貌，阐述了扶余油层枝状浅水三角洲沉积特征，孙雨等（2012）考虑扶余油层沉积时期“双源”河控作用，建立了河控浅水三角洲沉积模式，这些认识多为对扶余油层沉积过程中沉积相发育类型、空间展布及时空演化的宏观认识。现今扶余油层勘探开发程度高，孔隙度集中在 5%～12%，渗透率集中在（0.01～1.00）× 10^{-3} μm^2，表现出低孔、低渗—特低渗致密砂岩储集层特征（蒙启安等，2014；王小军等，2024），基于扶余油层浅水曲流河三角洲沉积特征与高频旋回演化研究，揭示有利储集层砂体的时空展布规律，是制定精准开发方案、支撑松辽盆地扶新隆起带南部老油田稳产的关键。

在前人研究基础上，运用 100 余口探评井的测井、18 口井的录井和岩心、8 口井的粒度分析等多种资料，对扶新隆起带南部扶余油层沉积特征与演化开展研究，分析多物源水系、盆广坡缓背景下浅水曲流河三角洲的沉积相发育特征，提出高频基准面旋回演化下浅水曲流河三角洲的时空展布响应和沉积模式，并明确分流河道、水下分流河道等主力砂体的内部沉积特征与微观展布差异，以期为下一步扶新隆起带南部扶余油层的有利储集层预测及油气精细勘探开发提供重要依据。

1　区域地质概况

松辽盆地为中国东部以中—新生代沉积为主的大型陆相复合型盆地，是白垩纪亚洲古陆上最大的湖盆，盆地面积约 26×10^4 km^2（Wang *et al.*，2013；张莉等，2017），发育断—拗双重结构。海西—印支期以来，松辽盆地基底被逐渐剥蚀，盆地主要经历 3 个构造演化阶段（刘招君等，1992；王璞珺等，2015）：（1）早期燕山运动Ⅱ幕作用，松辽盆地深部莫霍面拱起并伴随大规模断块活动及火山喷发，为盆地伸展断陷期（150～110 Ma）。在此阶段，主要由火山熔岩、沉积岩组成的火石岭组（K_1h）、沙河子组（K_1sh）、营城组（K_1yc）沉积，火山岩类占该时期充填物的一半以上，沉积岩主要在沙河子组出现，为欠补偿沉积。（2）地壳受重力均衡和热沉降作用产生差异下沉，为盆地热沉降拗陷期（110～79.1 Ma）。下白垩统登娄库组（K_1d）、泉头组（K_2q）为盆地填平补齐时期沉积，其中泉头组沉积时期，盆地呈现沉积面积广、构造坡度缓、古气候干旱炎热、古水深动荡且浅等特征（朱筱敏等，2012），来自西南物源区的通榆—保康水系、西部物源区的红岗—英台水系、东南物源区的长春—怀德水系进行充足的物源供给，有利于盆地南部浅水三角洲的形成（陈少军等，2006）。青山口组（K_2qn）、姚家组（K_2y）、嫩江组（K_2n）沉积期间，先后出现 2 次大规模湖侵，登楼库组（K_1d）沉积晚期，盆地整体开始较均一沉降，至嫩江组沉积时期，盆地沉积巨厚层河湖相碎屑岩而成为统一的大型湖盆（葛荣峰等，2010）。（3）在嫩江组（K_2n）末期，盆地进入构造反转期（79.1～40 Ma），随着太平洋板块俯冲的增强，日本海扩张产生挤压应力，导致周围板块的不平衡压缩，形成补偿性沉积。在这个阶段沉积了四方台组（K_2s）、明水组（K_2m）等地层（图 2-a）（任丽华等，2017；Deng *et al.*，2022）。

扶新隆起带位于松辽盆地中央坳陷区的南部，在西南、西北、北部分别与长岭凹陷、大安凹陷、三肇凹陷毗邻，东南方向与东南隆起区相接，为在前侏罗系基岩之上衍生的继承性古隆起（孙雨等，2010，2012）（图 1-a），历经近 60 年勘探开发，依然为松辽盆地南部主要油气富集区之一。研究区位于扶新隆起带南部一鼻状构造带上，东北部为构造高点，整体为向西南方向倾斜的单斜构造，区内

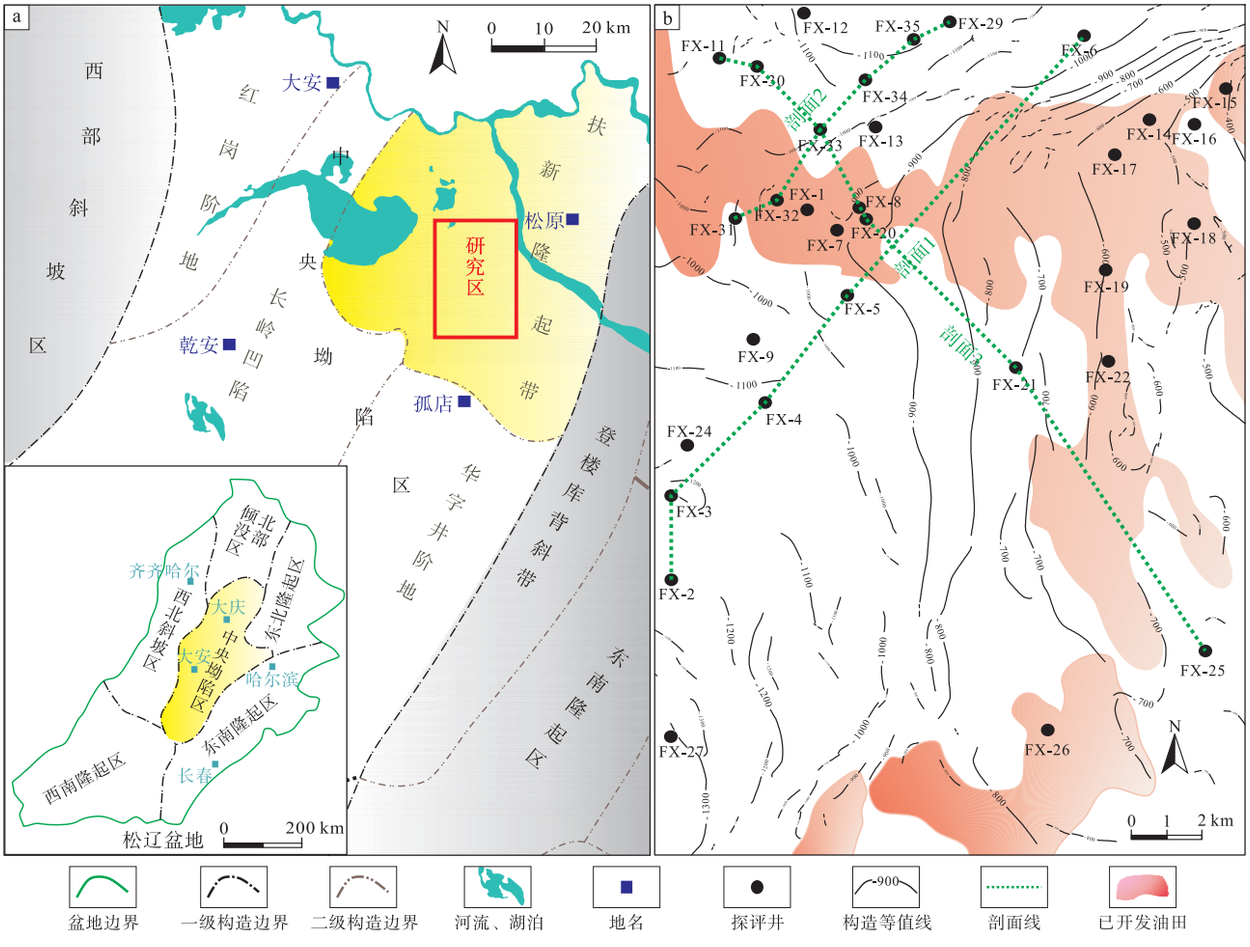


图 1 松辽盆地扶新隆起带构造分区图（a）（据任丽华等，2017；有修改）及研究区井位图（b）

Fig. 1 Tectonic zoning map of Fuxin uplift belt in Songliao Basin (a) (modified from Ren *et al.*, 2017) and well location map of the study area (b)

涉及扶余油田、新木油田、新民油田等多个油田，具探评井 132 口，包含取心资料钻井约 10 余口，基础资料丰富(图 1-b)。

扶新隆起带南部下白垩统泉头组为油气勘探开发的重要层位，于松辽盆地拗陷初期沉积，总厚度为 500~1000 m，自下而上划分为 3 个油层，泉头组一段、二段对应于农安油层，泉头组三段对应于扬大城子油层，目的层扶余油层即为泉头组四段，与杨大城子油层合力已探明储量约 10×10^8 t，现今坳陷区扶余油层仍具有较大规模剩余油气资源（沈华等，2023）。扶余油层沉积时期，松辽盆地处于全盛湖水扩张期，该时期扶新隆起带南部主要为西南通榆—保康物源水系和东南怀德—长春物源水系共同供给，河道展布呈 SW-NE 向，发育一套以辫状河—曲流河—三角洲沉积为主的砂泥岩组合(图 2-b)（孙雨等，2012；Deng *et al.*, 2022）。

2 高分辨率层序地层格架

2.1 基准面旋回界面识别

以 Cross（1988）为代表创立的高分辨率层序地层学派，强调不同期次旋回中沉积物体积受可容空间与补给通量（A/S）变化的控制，表现为沉积物的堆积样式、相类型与相序、岩石结构与构造、保存程度等发生变化。基准面旋回界面识别是进行地层中多级次基准面旋回与精细等时地层对比的关键，其中基准面即为沉积物卸载、过路、侵蚀作用等影响下，相对于地球表面呈连续波状升降的“抽象面”（朱筱敏，2000）。利用岩心与测井、录

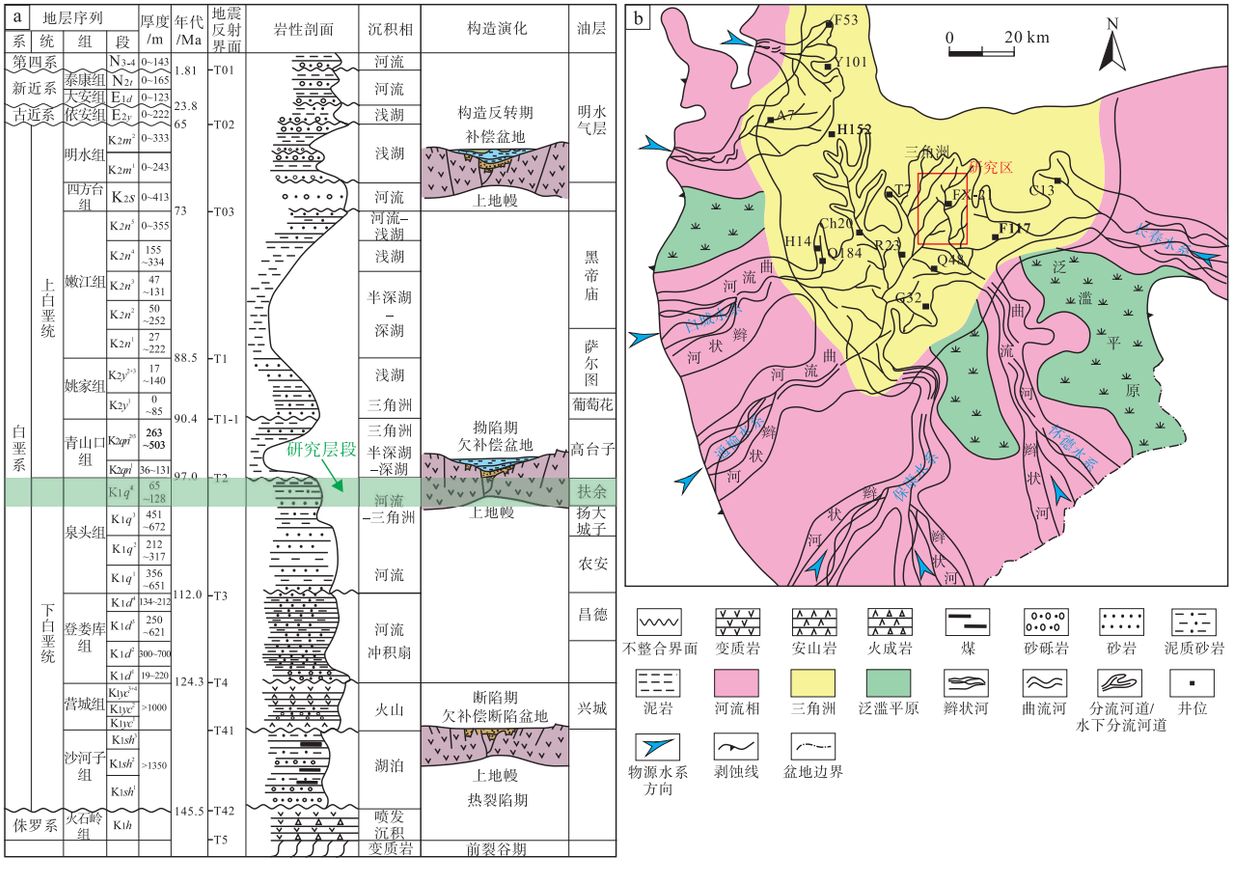


图 2　松辽盆地中央坳陷区地层综合柱状图（a）（据 Deng *et al.*，2022；有修改）及松辽盆地南部扶余油层沉积相带平面分布图（b）（据张鑫，2011；有修改）

Fig. 2　Comprehensive histogram of stratigraphy in central sag area of Songliao Basin（a）（modified from Deng *et al.*, 2022）and plane distribution map of sedimentary facies zones of the Fuyu oil layer in southern part of Songliao Basin（b）（modified from Zhang, 2011）

井等资料，结合沉积地质背景，通过测井曲线特征、沉积旋回、地层叠置样式与 INPEFA 技术结合，可实现定性且定量识别基准面旋回界面，建立高精度层序地层格架。

INPEFA（Intergrated Prediction Error Filter Analysis）技术为基于测井曲线定量划分层序的重要方法，通常该曲线的拐点可反映不同级次的层序界面，例如曲线由负趋势转变为正趋势的拐点，代表由砂质含量高于预测值转向泥质含量高于预测值的突变位置，对应于由水退时期沉积转换为水进时期沉积（Nio *et al.*, 2005）。研究区扶余油层主要为砂泥沉积组合，故选取自然伽马曲线进行预测误差分析。通过自然伽马曲线实际值减去由最大熵谱分析（MESA）处理得到的估计值，即得到 PEFA（预测误差滤波分析曲线）（王梦琪等，2016），将 PEFA 曲线进一步积分后综合取得 INPEFA（预测误差趋势）曲线，曲线的形态、趋势和拐点可划分不同级次的层序，利用整体和不同深度段窗口的 INPEFA 可分别识别出长周期、中周期和短周期尺度下的高精度沉积旋回（路顺行等，2007）。

扶余油层即泉四段，自下而上分为泉四段Ⅳ砂组（$FⅠ_4$）、Ⅲ砂组（$FⅠ_3$）、Ⅱ砂组（$FⅠ_2$）、Ⅰ砂组（$FⅠ_1$）。依据多口井全井段岩心观察，根据界面处岩性发生砂泥岩突变和伴随大型槽状交错层理构造发育、INPEFA 曲线正负趋势的转折点等特征进行层序界面识别，明确扶余油层为一不完整的三级层序，整体为长期基准面上升的半旋回。在三级层序内部，可根据冲刷面及滞留沉积的发育、短期旋回叠置样式、INPEFA 曲线的次级正、负趋势拐点划分出 4 个四级层序，分别为 MSC1、MSC2、

MSC3、MSC4。其中 MSC1、MSC2 在底部界限处为洪泛面，泥岩颜色由灰绿色突变紫红色，旋回内部砂质含量逐渐增多，泥质含量减少，INPEFA 曲线整体呈负趋势，中期基准面旋回以下降半旋回为主；MSC3 和 MSC4 在底部界限处为中高幅冲刷面，沉积槽状交错层理砂岩，旋回内部泥质含量逐渐增多，INPEFA 曲线整体呈正趋势，中期基准面旋回以上升半旋回为主。在四级层序内部，依据砂岩厚度旋回变化、冲刷面及滞留沉积、INPEFA 曲线再次一级的正、负趋势拐点划分出 13 个五级层序（图 3）。

2.2 色度指数及旋回特征

沉积岩在搬运、沉积到固结成岩过程中受沉积环境影响极大，沉积水体的氧化还原程度不同，岩石中自生矿物的颜色一般也对应变化（路顺行等，2007）。在暴露的氧化环境下，矿物呈棕色、紫红色等氧化色；在水体较浅的弱还原—弱氧化环境下，矿物呈灰绿色、灰白色、浅灰色等指示色；在水体较深的还原环境中，矿物呈灰黑色—黑色等还原色。通过开展扶新隆起带南部扶余油层取心井资料的观察描述，发现其成岩矿物颜色变化与沉积时

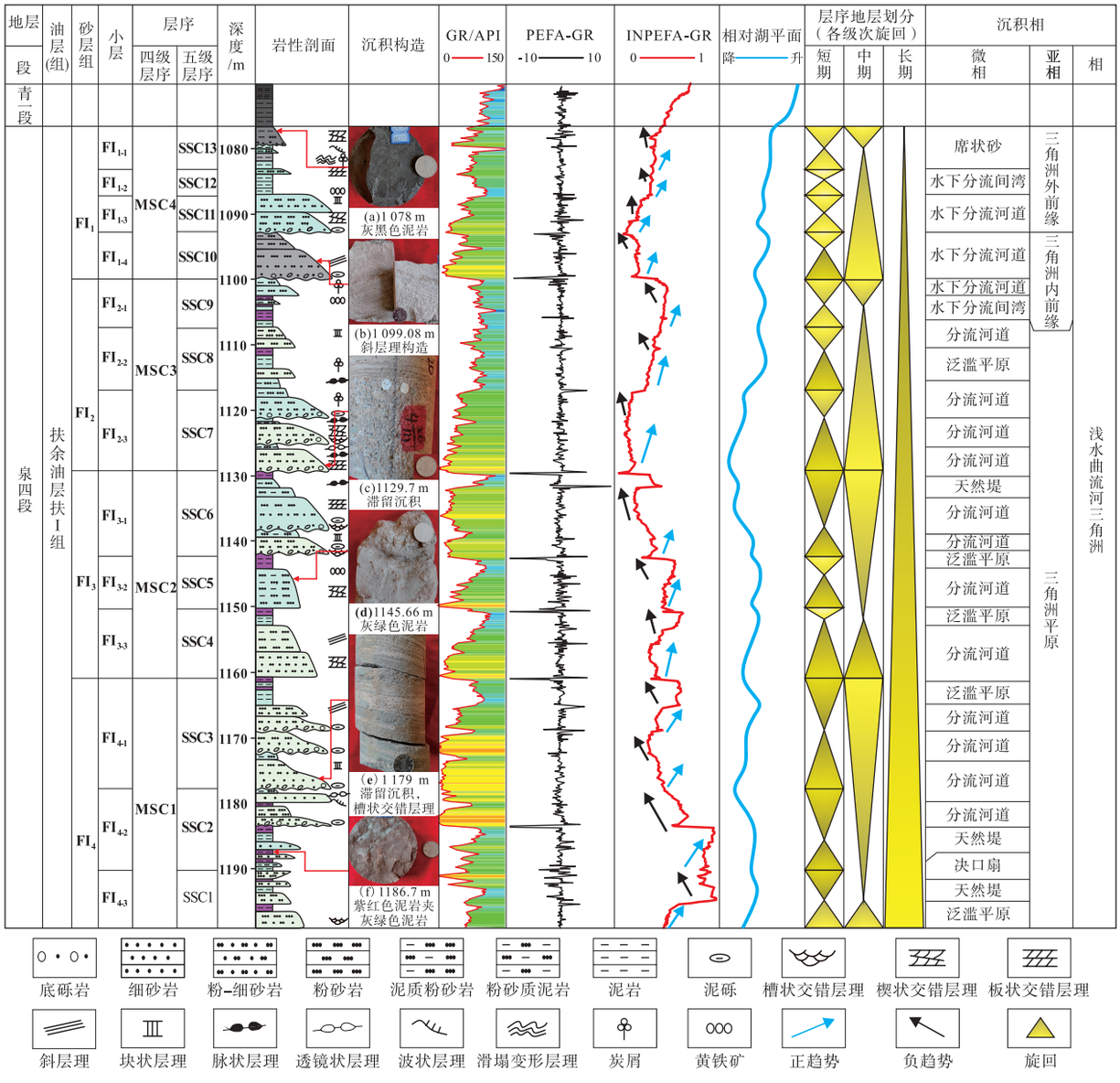


图 3 松辽盆地扶新隆起带南部 FX-1 井扶余油层层序地层柱状图

Fig. 3 Sequence stratigraphic column of the Fuyu oil layer of Well FX-1 in southern Fuxin uplift zone, Songliao Basin

期氧化还原环境变化有良好响应，可进一步为较浅沉积水体下基准面的高频变化提供证据，且辅助后续沉积相划分与识别。

利用岩心资料和录井信息开展色度指数分布研究（王斌等，2023）。首先，由于扶余油层厚度在119~127 m 区间范围内，整体厚度相对较小，故将2 m 厚度作为一个地层单元，之后，根据成岩矿物颜色对应的氧化还原性强弱，赋予地层单元对应的色度系数（表 1），氧化还原程度相近的颜色作模糊处理，如棕色与紫红色表示强氧化性，故色度系数均为 1，然后在 2 m 地层单元中将单层色度系数乘以单层厚度，结果求和后除以地层单元厚度 2 m，即得到对应地层单元的色度指数。将研究层段依次开展上述计算，并推及到平面各井，即得到色度指数垂向和平面分布序列。色度指数正值即代表氧化环境沉积，值越大，氧化程度越强，色度指数负值即代表还原环境沉积，值越小，还原程度越强。

依据色度系数建立扶新隆起带南部扶余油层色度指数垂向变化和平面展布。以 FX-9 井为例，该井位于研究区西北部，其色度指数垂向变化特征表现为：MSC1 和 MSC2 沉积时期，泥岩以紫红色即强氧化色为主，细砂岩、粉砂岩以灰绿色和浅灰色等弱氧化—弱还原色为主，色度指数正负值频繁交替，代表氧化—还原环境的变化，反映基准面高频振荡，且中期旋回界面与色度指数最大正值处响应；MSC3 沉积时期，泥岩颜色以紫红色为主，细砂岩、粉砂岩以灰色、浅灰色等还原—弱还原色为主，色度指数仍呈现正负值频繁交替现象，但差值较小；MSC4 沉积时期，泥岩颜色以黑色、灰色等强还原—还原色为主，粉砂岩以灰色、灰褐色等还原—弱还原色为主，色度指数整体为负值，但负值大小也在高频变化，反映水体加深时期基准面仍然在高频振荡（图 4-a）。总体上 MSC1-MSC3 沉积时期氧化色厚度占地层总厚的三分之二左右，MSC4 沉积时期基本为还原色，在紫红色泥岩中局部可见呈斑点状或片状的灰绿色泥岩侵入，如取心井 FX-1、FX-7 等井中现象明显。以上现象均表明扶余油层沉积时期处在水体较浅且基准面高频变化的环境中，表现为氧化还原环境发生周期性变化。基于上述色度指数计算方法，选取扶新隆起带南部典型钻井，开展色度指数平面展布研究（图 4-b），扶余油层沉积时期整体以氧化色为主，表明该时期整体偏氧化环境沉积，自西南部向东北部，还原色占比逐渐提高，FX-19 井、FX-22 井等的还原色占比超过 60%，指示氧化环境向还原环境过渡。

综上所述，扶新隆起带南部扶余油层沉积时期，水体深度不断变化，表现为氧化环境和还原环境交替出现，但整体以氧化—弱还原环境为主，揭示其处于基准面高频变化、水体深度浅的沉积环境。

2.3　层序地层格架

研究区扶余油层整体为单一的水进沉积。由于沉积于稳定拗陷期，盆地经历填平补齐后坡度较缓，扶余油层总体自西南向东北厚度变化较小，但其内各四级层序受沉积基准面波动影响，具有较为明显的地层厚度变化。

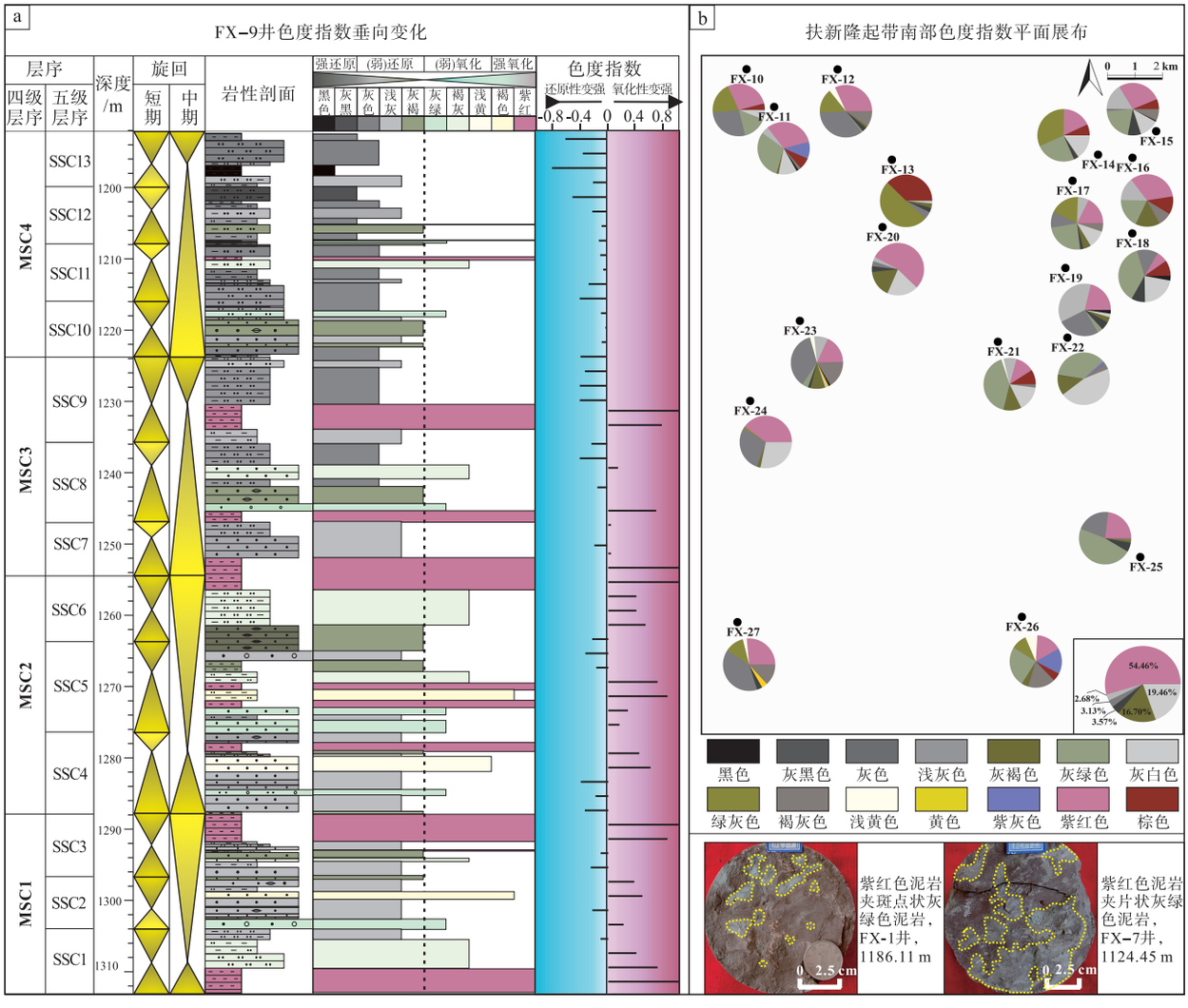
基于 GR、INPEFA-GR、LLD 曲线和岩性旋回特征等，以 SW-NE 向即顺物源水系方向剖面 FX-2 井-FX-3 井-FX-4 井-FX-5 井-FX-6 井为例，建立层序格架（图 5）。表明扶余油层整体厚度为 124~127 m。MSC1 沉积时期，地层厚度变化较小，GR 和 LLD 曲线呈多个齿化钟型的叠加，为短期水进—水退的旋回组合；MSC2 沉积时期整体以水退为主，GR 和 LLD 曲线以齿化的钟型和箱型为特征，地层厚度向东北方向逐渐变厚；MSC3 沉积时期以水进为主，地层厚度向东北方向逐渐减薄；MSC4 沉积时期为持续水进后短暂水退，地层厚度整体变化不大，存在受下伏地层继承性充填导致的微小程度起伏。

总体上，扶新隆起带南部扶余油层不同地区具有不同的层序旋回组合特征，反映可容空间与补给通量在沉积过程中不断地变化，同时体现沉积相带在研究区扶余油层沉积时期发生了迁移与演化。

表 1　松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层氧化还原色度系数

Table 1　REDOX chromaticity coefficient of the Fuyu oil layer in southern Fuxin uplift zone of Songliao Basin

氧化还原指数	强还原		还原—弱还原			弱氧化—氧化			强氧化	
颜色	黑色	灰黑色	灰色	浅灰色	灰褐色	灰绿色	褐灰色	浅黄色	褐色	紫红色
系数	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0.2	0.4	0.6	0.8	1



a—FX-9 井色度指数垂向变化图；b—色度指数平面展布图

图 4 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层色度指数分布

Fig. 4 Chroma index distribution of the Fuyu oil layer in southern Fuxin uplift zone of Songliao Basin

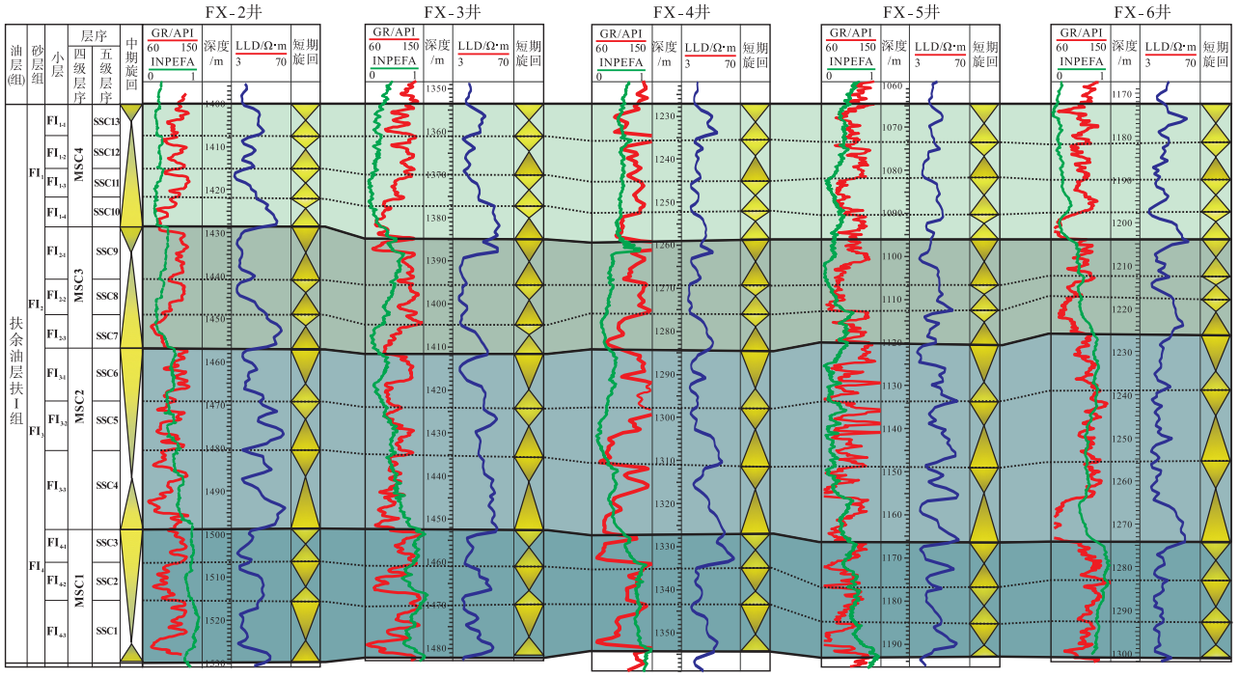
3 沉积特征与沉积相类型

通过对研究区钻井岩心的沉积岩石学特征、色度指数特征、砂体成因序列特征、沉积微相类型等综合分析，判定松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层发育沉积体系为浅水曲流河三角洲，并明确其沉积特征。

3.1 沉积岩石学特征

扶新隆起带南部扶余油层岩性以含砾细砂岩、细砂岩和粉砂岩、泥岩为主，局部区域可见薄层煤和砂泥薄互层沉积(图 6-a)。岩石主要为岩屑长石砂岩，其次为长石岩屑砂岩和长石砂岩，长石含量集中在 20%~38.8%之间，石英含量集中在 30%~67.8%之间，岩屑含量集中在 10%~39.6%之间(图 6-b)。

据岩心观察结果显示，松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层发育多种沉积构造。中砂岩、细砂岩中普遍发育槽状交错层理(图 7-a，7-b，7-d)、楔状交错层理(图 7-c，7-e，7-f)、板状交错层理(图 7-g，7-h) 等，整体反映沉积时期受河流作用以及沉积水动力条件较强的特征。在槽状交错层理纹层内常见顺层沉积的灰绿色泥砾(图 7-a，7-b)，主要成因为河道曲率较大，沉积过程中水流侧向侵蚀凹岸，携带泥砾冲刷，滞留沉积而成。滞



注：此图中涉及图例与图 3 中部分图例相同。

图 5　松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层连井高频基准面旋回格架（剖面位置见图 1）

Fig. 5　High-frequency base-level cycle framework of connected wells in the Fuyu oil layer, southern Fuxin uplift zone of Songliao Basin (Section 1, see Fig. 1 for the position)

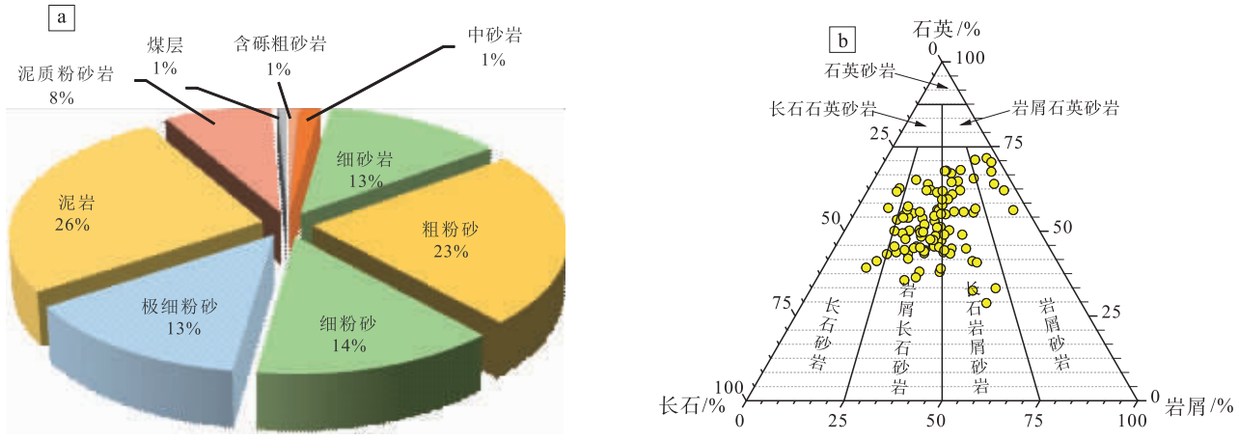
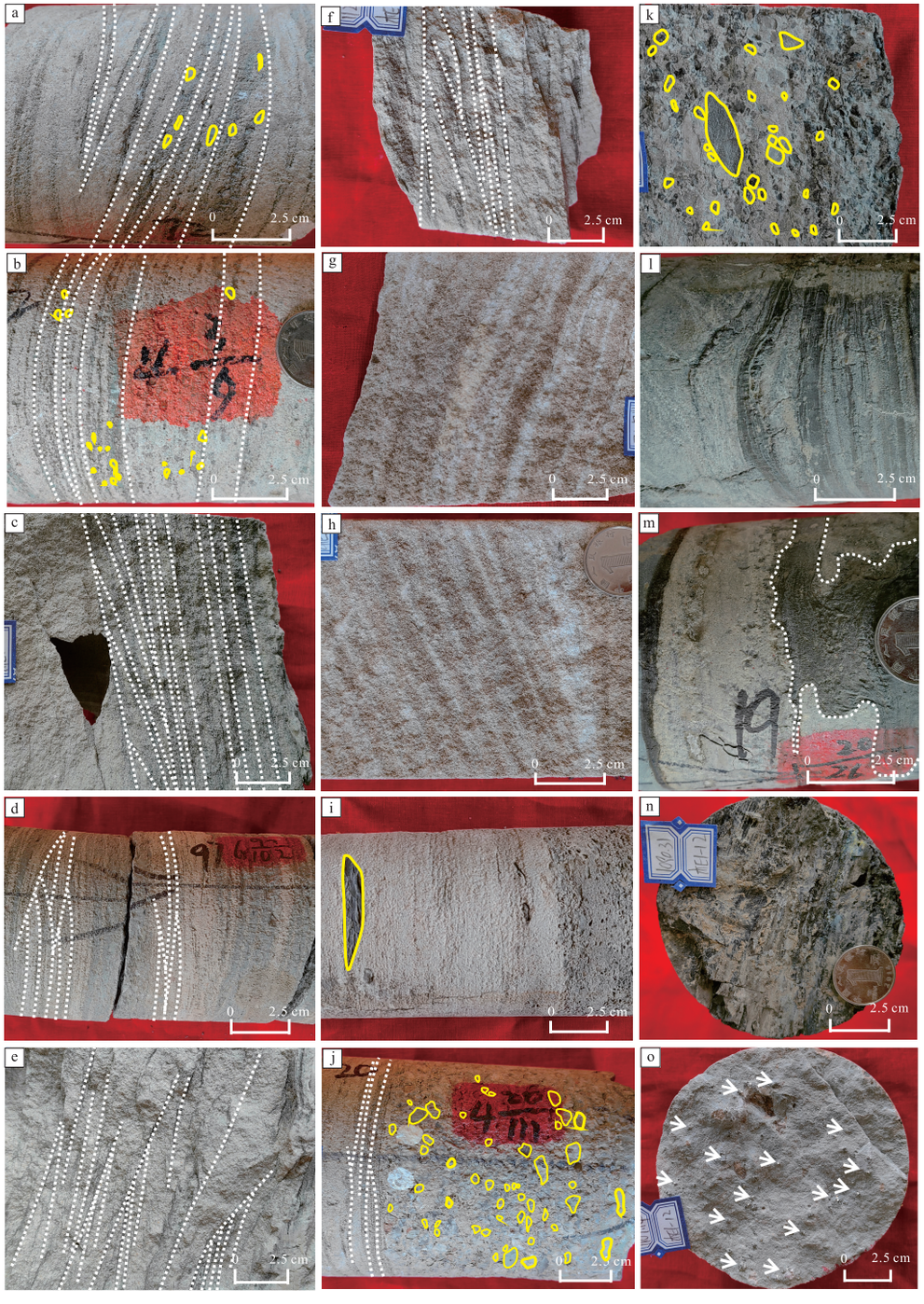


图 6　松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层岩石粒度组成饼状图（a）与砂岩碎屑组分三角图（b）

Fig. 6　Pie chart of grain size composition (a) and triangular diagram of sandstone detrital components (b) of the Fuyu oil layer rocks in southern Fuxin uplift zone of Songliao Basin

留沉积附近沉积的细砂岩中可见粗粒泥质颗粒侵入（图 7-i），含砾砂岩中砾石成分较为复杂（图 7-j，7-k），粒径可达 4 cm，分选中等，磨圆以次圆状—次棱角状为主，局部可达圆状，砾石排列呈明显定向性，长轴方向大致与层面平行，夹角普遍小于 45°，与下部泥岩层段呈冲刷接触。在细砂岩中，可见与楔状交错层理和板状交错层理伴生的平行层理（图 7-c）。粉砂岩中主要发育脉状层理（图 7-l）、变形层理（图 7-m），可见生物扰动现象等，反映在沉积过程中湖平面频繁摆动，造成砂泥间互沉积，且二者在垂向上出现不均匀叠置，此类构造常见于三角洲前缘沉积中。在细粒沉积物中，偶见薄层煤（图 7-n）和植物碎屑，通常反映在此期间盆地稳定沉降。灰绿色粉砂岩中见大量黄



a—大型槽状交错层理细砂岩，夹灰绿色泥砾，FX-7 井，井深 1122.24 m；b—大型槽状交错层理细砂岩，夹灰绿色泥砾，FX-8 井，井深 1107.86 m；c—底部平行层理，顶部小型楔状交错层理细砂岩，FX-7 井，井深 1070.11 m；d—小型槽状交错层理细砂岩，FX-1 井，井深 1179.1 m；e—楔状交错层理粉砂岩，FX-8 井，井深 1102.39 m；f—小型楔状交错层理细砂岩，FX-1 井，井深 1122.38 m；g—板状交错层理细砂岩，油浸，FX-7 井，井深 1132.69 m；h—板状交错层理细砂岩，油浸，FX-1 井，井深 1134.15 m；i—底部滞留沉积，顶部泥砾侵入体，FX-1 井，井深 1101.72 m；j—底部滞留沉积，顶部槽状交错层理细砂岩，FX-1 井，井深 1131.7 m；k—近顺层排列泥砾，滞留沉积，FX-1 井，井深 1205.23 m；l—底部水平层理，受生物扰动改造的脉状层理粉细砂岩，FX-7 井，井深 1068.65 m；m—变形层理，FX-7 井，井深 1069.08 m；n—薄层煤，FX-7 井，井深 1090.31 m；o—灰绿色泥质粉砂岩夹大量黄铁矿，FX-7 井，井深 1107.14 m

图 7 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层典型岩心照片

Fig. 7 Typical core photos of the Fuyu oil layer in southern Fuxin uplift zone of Songliao Basin

铁矿发育(图 7-o)，反映了浅水还原环境。以河流作用为主导形成的各种交错层理构造，和波浪潮汐作用下形成的脉状层理、变形层理、生物扰动构造等同时出现，为浅水三角洲沉积的标志。

3.2　旋回与砂体成因序列

扶新隆起带南部扶余油层具典型沉积序列，三角洲平原分流河道和前缘水下分流河道为骨架砂体，特征显著(图 8)。分流河道为滞留沉积与边滩的组合沉积，其中滞留沉积主要由含砾粗砂岩组成，为河流在高流量短距离搬运下的产物，发育明显的冲刷面，向上沉积颗粒逐渐变细，过渡到由细砂岩、粉砂岩和泥质粉砂岩组成的边滩沉积，层理构造表现出槽状交错层理、楔状交错层理—平行层理的演变。分流河道粒度概率累积曲线为典型的跳跃—悬浮式，跳跃总体含量大于 70%，悬浮总体含量 15%～20%，两者相交点 Φ 值为 4.0 左右(图 8-a)。当陆源碎屑供给充足时，分流河道以加积为主，发育完整的滞留沉积和边滩沉积，河道砂体分布在大段沉积的泛滥平原泥岩中，如 FX-28 井 554～541 m 深度范围的沉积。当湖水反复振荡时，导致河道频繁迁移改道，垂向上可见河道叠复冲刷，呈现多期缺乏顶层沉积的“二元结构”叠置特征，如 FX-28 井 541～533 m 深度范围的沉积。当水动力相对较强时，前期沉积的细粒沉积物被冲刷，即边滩后期被冲刷，而后沉积叠置新一期的河道沉积。

三角洲前缘以水下分流河道沉积为主，河口坝发育。水下分流河道为平原分流河道向湖的继续延伸，多沉积细砂岩、粉砂岩，向上可见水下分流间湾泥岩及泥质粉砂岩，夹杂较多植物碎屑，可见冲刷面、槽状交错层理、楔状交错层理、脉状层理和波状层理等沉积构造。河口坝形成于复杂的水动力条件，岩性自下而上由粉砂岩递变到粉细砂岩，发育波状层理、透镜状层理以及生物扰动等沉积构造，粒度概率累积曲线为高斜跳跃悬浮式，跳跃总体分为 2 个跳跃组分，总含量约 80%，砂岩分选好，悬浮组分含量较少，约为 20%，表现出波浪作用加工的典型曲线特征(图 8-b)。波浪作用主导的河口坝沉积，受强波浪阻滞和弱河流能量影响，往往发育在入湖搬运距离较短的水下分流河道河口处，平面上呈新月形、圆形等。

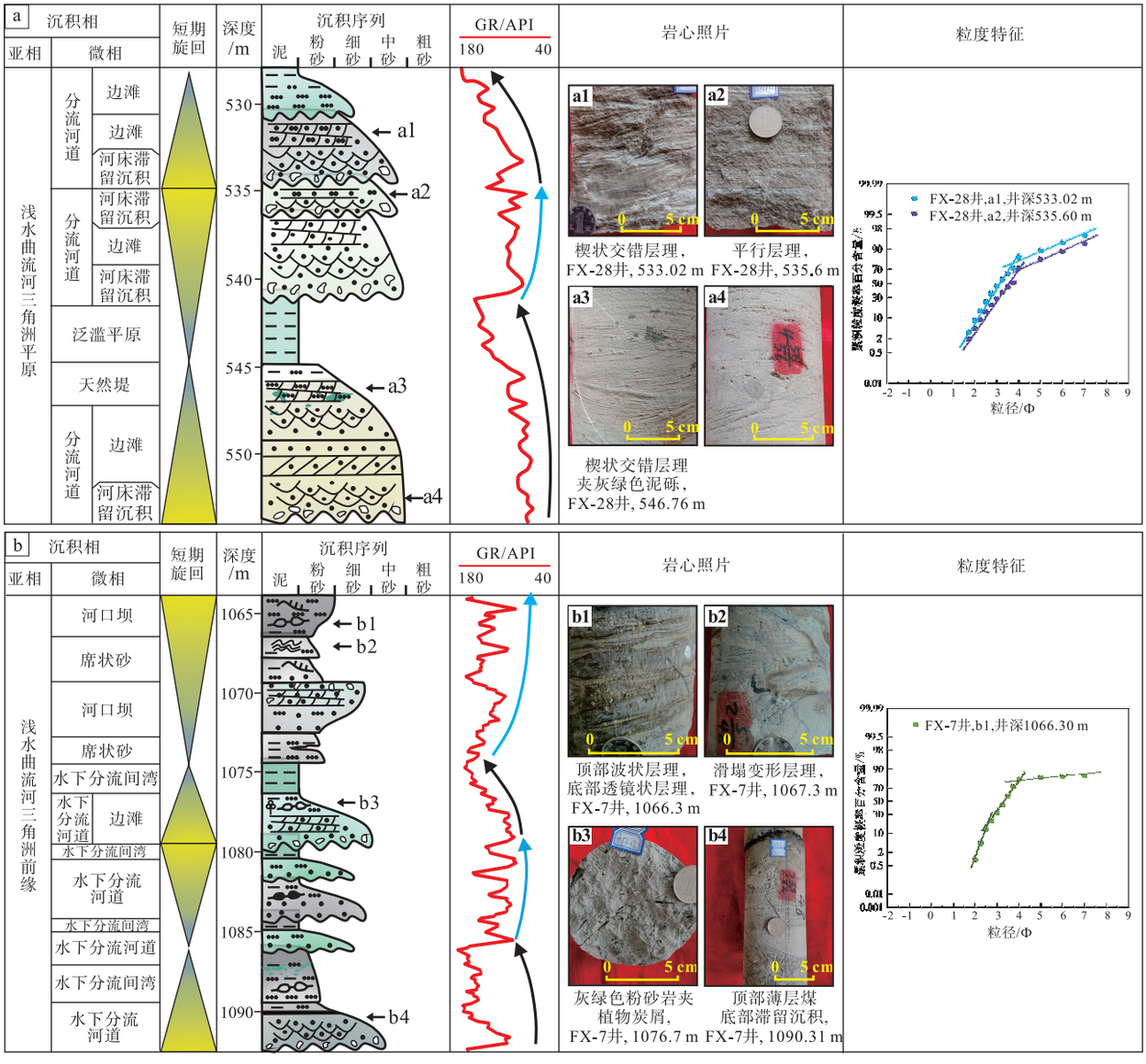
可见，浅水曲流河三角洲分流河道或水下分流河道发育 2 种典型的沉积序列，其一为具滞留沉积和边滩的完整序列，在短期基准面上升半旋回中，河流搬运能力减弱，沉积作用增强，故可见此类完整序列，水下分流河道较分流河道砂体粒度细，沉积构造以波状层理、沙纹层理为主。其二为具滞留沉积和不完整边滩或缺乏边滩的沉积序列，在基准面下降半旋回中，浅水三角洲沉积物间歇暴露且遭受弱冲刷侵蚀作用，河道侧向迁移能力增强，导致已沉积的边滩被侵蚀破坏；或可容纳空间发育速率减小导致河流回返，河流呈低流态、水动力弱，边滩沉积不太发育，仅保留河床底部滞留沉积。

3.3　沉积微相类型与特征

浅水三角洲沉积亚相及微相划分与正常三角洲类似，其中亚相可划分为三角洲平原、三角洲内前缘、三角洲外前缘及前三角洲，各亚相的划分依据沉积水体深度，主要由洪水面、枯水面和正常浪基面进行界定(图 9)。三角洲平原亚相主要发育于洪水面之上，以较粗粒分流河道沉积为主，伴随天然堤及泛滥平原。受基准面振荡和水动力驱动，分流河道向湖盆推进至洪水面以下转化为水下分流河道。三角洲前缘亚相划分为：(1) 内前缘（洪水—枯水面间)：连续水下分流河道（细砂岩）与间湾泥岩（灰绿/黑色为主)；(2) 外前缘（枯水面—浪基面间)：水下河道、河口坝及席状砂，受多向水动力改造形成广泛的薄层席状展布。前三角洲位于正常浪基面之下向盆地沉积中心的一侧，以暗色细粒沉积物为主，或砂泥互层的浊流沉积组合(朱筱敏等，2023)。

浅水曲流河三角洲以曲流河做供源水系，沉积于盆大、坡缓、水浅的沉积环境，除具备上述岩心沉积构造、色度变化、砂体沉积序列特征外，测井曲线形态同样具有典型特征，自然伽马和电阻率测井曲线对于沉积物岩性、粒度、水动力等具有良好的响应，利用二者可明晰三角洲各沉积微相对应的测井沉积相特征(表 2)。

三角洲平原以分流河道为骨架砂体，分流河道砂体岩性较粗，以中—细砂岩、粉砂岩为主，分选较好，为厚层沉积，与紫红色、浅灰绿色泥岩构成少泥的间断正韵律，底部发育槽状交错层理(图 7-a，7-b)、楔状交错层理(图 7-e，7-f)，测井相



注：此图中涉及图例与图 3 中部分图例相同。

图 8 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层浅水曲流河三角洲平原（a）和前缘（b）典型沉积序列

Fig. 8 Typical sedimentary sequences of shallow water meandering river delta plain (a) and its front (b) in the Furong oil layer in southern Fuxin uplift zone of Songliao Basin

以中高幅齿化箱型为主，反映沉积过程物源供给充足，水动力条件整体稳定但存在间歇性振荡导致的沉积叠加。天然堤为洪水期漫溢在分流河道两侧的细砂岩、粉砂岩沉积物堆积而成，厚度薄，测井相为低幅齿化钟型，反映沉积过程水体能量较低并逐渐减弱。泛滥平原为分流河道之间水动力较弱的细粒沉积物，分布范围较广，岩心主要为紫红色、灰绿色泥岩、泥质粉砂岩，泥岩中可见炭屑、植物根茎化石等，主要发育透镜状层理和生物扰动构造，测井相为微齿近平直，无明显的韵律性，反映沉积过程水动力平稳。

三角洲内前缘以水下分流河道和水下分流间湾为主，并以水下分流河道作为骨架，发育粉砂岩为主且较为连续，可见含炭屑泥质粉砂岩或薄层煤（图 7-n），底部常为冲刷面沉积，向上发育波状层理、脉状层理（图 7-l）、变形层理（图 7-m）等，测井相以较高幅钟型为主，且可见多个钟型叠置，少见齿化箱型，与水下分流间湾灰绿色、灰

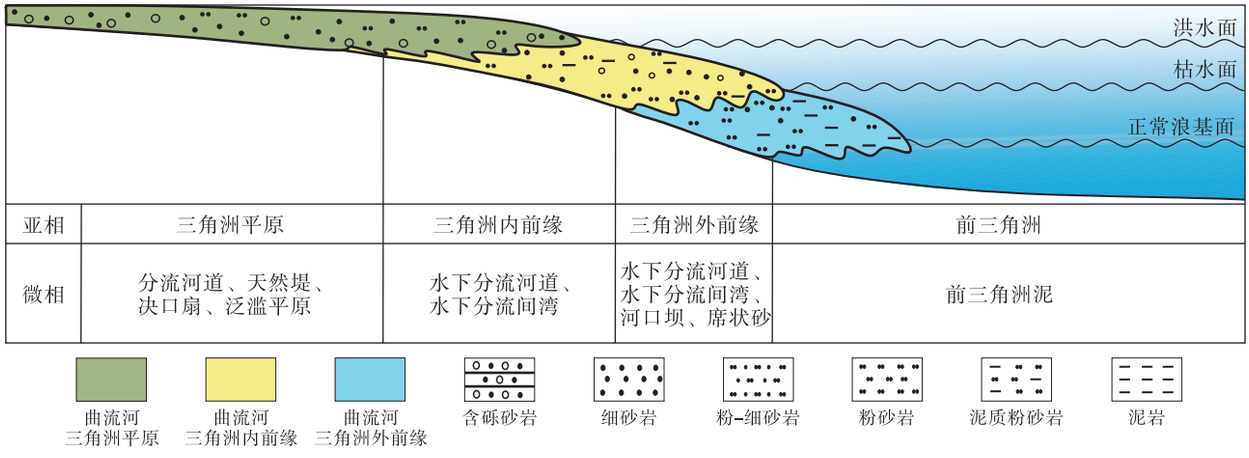


图 9　浅水三角洲沉积亚相与微相划分（据朱筱敏等，2023；有修改）

Fig. 9　Subfacies and microfacies division of shallow water delta sediments (modified from Zhu *et al.*, 2023)

表 2　松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层沉积相岩性及测井曲线特征

Table 2　REDOX chromaticity coefficient of the Fuyu oil layer in southern Fuxin uplift zone of Songliao Basin

相	亚相	微相	GR 曲线	垂向序列	RLLD 曲线	曲线形态	色率	岩相
浅水曲流河三角洲	平原	分流河道				齿化箱型	弱还原色为主	交错层理中、细砂岩
		天然堤				指状	氧化色+弱还原色	波状层理粉砂岩、泥质粉砂岩
		泛滥平原				微齿近平直	氧化色+弱还原色	泥质-粉砂质泥岩为主，夹薄层煤
	内前缘	水下分流河道				齿化箱型+钟型	还原色为主	交错层理、平行/波状/透镜状层理细砂、粉砂岩
		水下分流间湾				微齿近平直	还原色为主	泥岩夹薄层粉砂岩
	外前缘	水下分流河道				微齿化钟型	还原色为主	交错层理、波状/透镜状层理粉砂岩
		水下分流间湾				微齿近平直	还原色	块状泥岩
		席状砂				齿化指状	还原色	生物扰动薄互层粉砂岩与泥岩
		河口坝				齿化漏斗	还原色	反粒序、波状/透镜状层理、生物扰动粉细砂岩

注：此图中涉及图例与图 3 中部分图例相同。

色、紫红色泥岩构成多泥间断正韵律。水下分流间湾由于基准面的高频变化，内前缘时而暴露在水面之上，时而处于水面之下，形成典型的紫红色、灰色、灰绿色泥岩间互沉积，测井相为微齿近平直，偶见薄层指状，指示水动力突变导致的沉积物卸载，为前缘席状砂典型特征。

三角洲外前缘为湖平面波动相对频繁时期沉积，水下分流河道沉积后受河流、波浪和沿岸流等冲刷，侧向迁移形成分布较广的席状砂体，从而外前缘以席状砂连片发育为主要特征之一。水下分流

河道的测井相以微齿化的钟型为主，沉积厚度与内前缘相比减薄，岩性主要为粉砂岩，且以灰绿色、灰色等还原色为主。河口坝微相主要由泥岩—泥质粉砂岩—粉砂岩的向上变粗序列组成，发育有波状层理、透镜状层理、沙纹层理等，测井相表现为齿化漏斗形特征，反映沉积过程中水体能量的大幅度减弱或沉积物供给不足。席状砂微相主要由薄互层的粉砂岩、泥质粉砂岩与泥岩构成，分选较好，是前缘河口沉积物受到湖浪影响、横向迁移形成的连片砂体，发育有滑塌变形层理、沙纹层理、水平层理等，表明在低能沉积条件下受到湖浪改造作用，测井相表现为中—低幅的指形互层叠加。水下分流间湾微相沉积厚层泥岩、泥质粉砂岩，沉积环境稳定故测井相特征表现为近平直的低幅曲线。

4 时空演化特征与沉积模式

通过层序旋回与充填特征研究、岩心精细观察描述、测/录井资料综合分析等，认为扶新隆起带南部扶余油层为水体呈总体上升趋势背景下的退积型浅水曲流河三角洲沉积，发育三角洲平原和三角洲内前缘、三角洲外前缘亚相。其中 MSC1、MSC2、MSC3 沉积时期以三角洲平原亚相沉积为主，MSC4 沉积时期主要发育三角洲前缘亚相沉积。整体沉积泥岩颜色由紫红色向灰绿色、灰色过渡，弱还原色与弱氧化色存在反复交叉沉积现象，反映扶新隆起带南部扶余油层沉积过程中，沉积水体逐渐加深并存在基准面高频振荡。

4.1 垂向演化特征

为揭示浅水曲流河三角洲横向展布规律，尤其是不同层段砂体的叠置样式，选取平行物源水系和垂直物源水系方向的 2 条剖面，再现沉积特征演变过程。

NE 剖面位于研究区西北部，平行于物源水系方向(图 10-a)。SSC1-SSC3 沉积时期，短期基准面高频振荡，中期基准面以下降半旋回为主，且初始湖平面相对较低，沉积微相以分流河道为主，整体砂体连续性好、延伸范围较远、沉积厚度较大，河道砂体间为局部接触，发育决口扇微相。SSC4-SSC6 沉积时期，中期基准面仍然以下降半旋回为主，但沉积物的供给速率大于可容空间的增长速率，分流河道多呈复合河道垂向叠置，砂体间横向连续性好、延伸范围远、沉积厚度大，河道砂体间多为对接式连通。SSC7-SSC9 沉积时期，基准面相对上升，可容空间的增长速率大于沉积物的供给速率，垂向上分流河道砂体沉积厚度减薄、连续性变差，随基准面持续上升，泛滥平原多发育，并向三角洲内前缘过渡。SSC10-SSC12 沉积时期，基准面上升速率加快，可容空间的增长速率远大于沉积物的供给速率，由三角洲内前缘向外前缘过渡，水下分流河道砂体以侧向加积为主，沉积厚度薄、连续性差，砂体间多呈孤立式分布，水下分流间湾泥岩多发育，局部区域发育河口坝微相。SSC13 沉积时期，基准面相对下降，物源供给增多，水下分流河道砂体和席状砂多发育。

SW 剖面贯穿研究区，位于研究区中部偏东北部位置，大致垂直于物源水系方向(图 10-b)。SSC1-SSC3 沉积时期西北部以分流河道沉积为主，河道纵横比值较小，中部发育决口扇沉积，东南部多发于泛滥平原沉积。SSC4-SSC6 沉积时期，分流河道砂体整体较为发育，沉积厚度大，两侧有天然堤沉积。SSC7-SSC9 沉积时期，可容空间增大，泥质含量较高，泛滥平原多发育，分流河道沉积厚度较薄、延伸较短。SSC10-SSC13 沉积时期，水下分流河道砂体纵横比较大，泥质含量高，水下分流间湾广泛发育，于研究区东北部由内前缘过渡为外前缘，水下分流河道砂体沉积厚度减薄，席状砂发育。

4.2 平面展布特征

研究区钻井数量达 100 余口，取心井段充足，综合沉积规律、物源方向的共同约束，在上述搭建的基准面旋回地层格架的基础上，选取 SSC1 至 SSC12 短期基准面旋回层序，恢复各时期浅水曲流河三角洲的空间展布格局，展示浅水曲流河三角洲沉积过程的高精度平面演变形态与基准面高频变化有良好的对应关系。

SSC1-SSC6 沉积时期，短期基准面经历上升—下降的高频振荡，水进—水退反复(图 11-a 至 11-f)。SSC1-SSC3 时期，初始可容空间相对较小，三角洲平原延展范围局限，分流河道砂体以条带状展布为主，河道具有较高弯曲度。SSC4-SSC6 时期，物源供给增加，基准面上升速率减慢，下降速率加快，分流河道表现为沉积过程中较稳定延伸的主河道，整体形态宽度在河流向前推进期间逐渐变

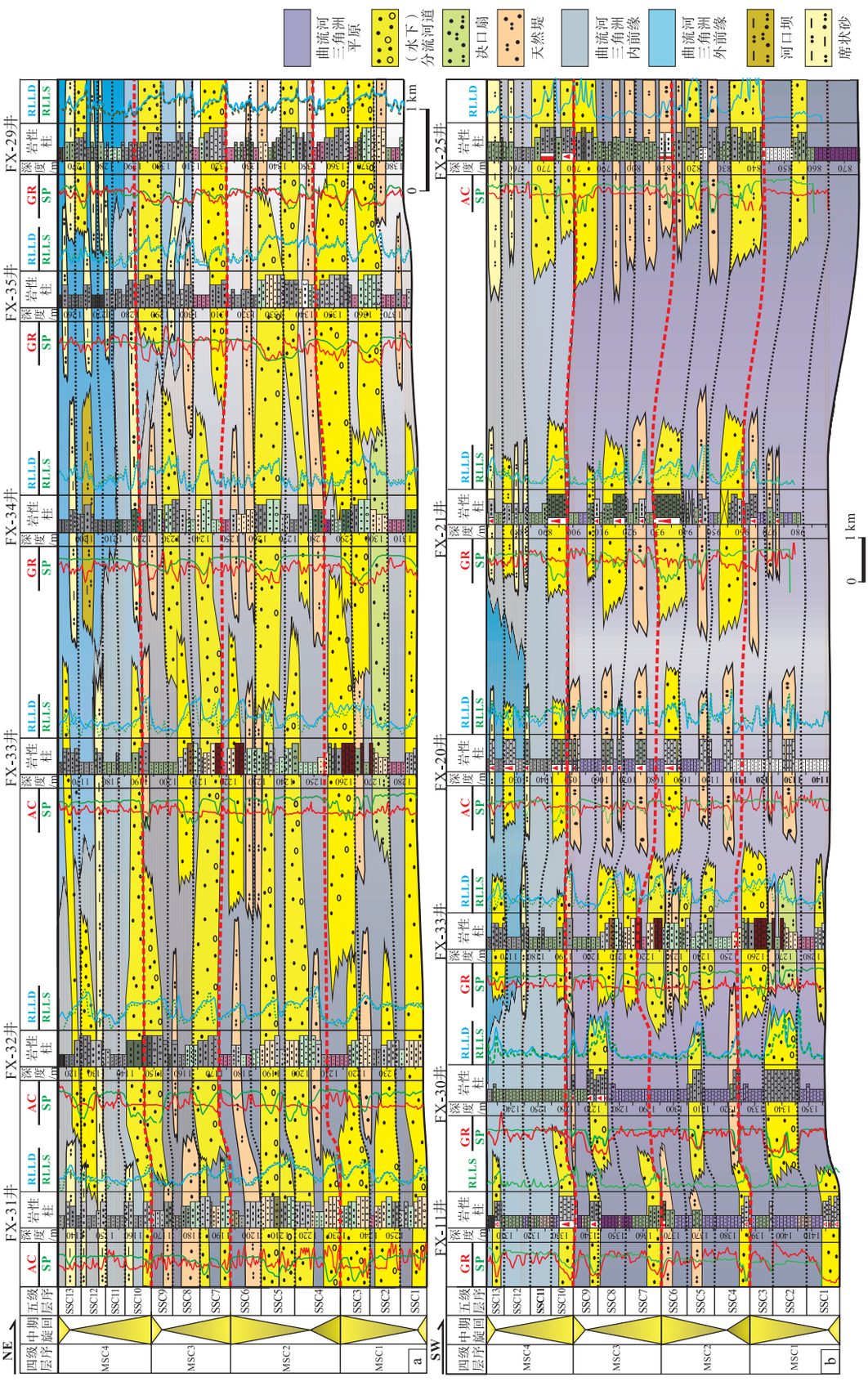


图 10　松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层沉积相横向展布（剖面位置见图 1，a—剖面 2，b—剖面 3）

Fig. 10　Lateral distribution of sedimentary facies of the Fuyu oil layer in southern Fuxin uplift zone of Songliao Basin (Section positions are shown in Fig. 1, a-section 2, b-section 3)

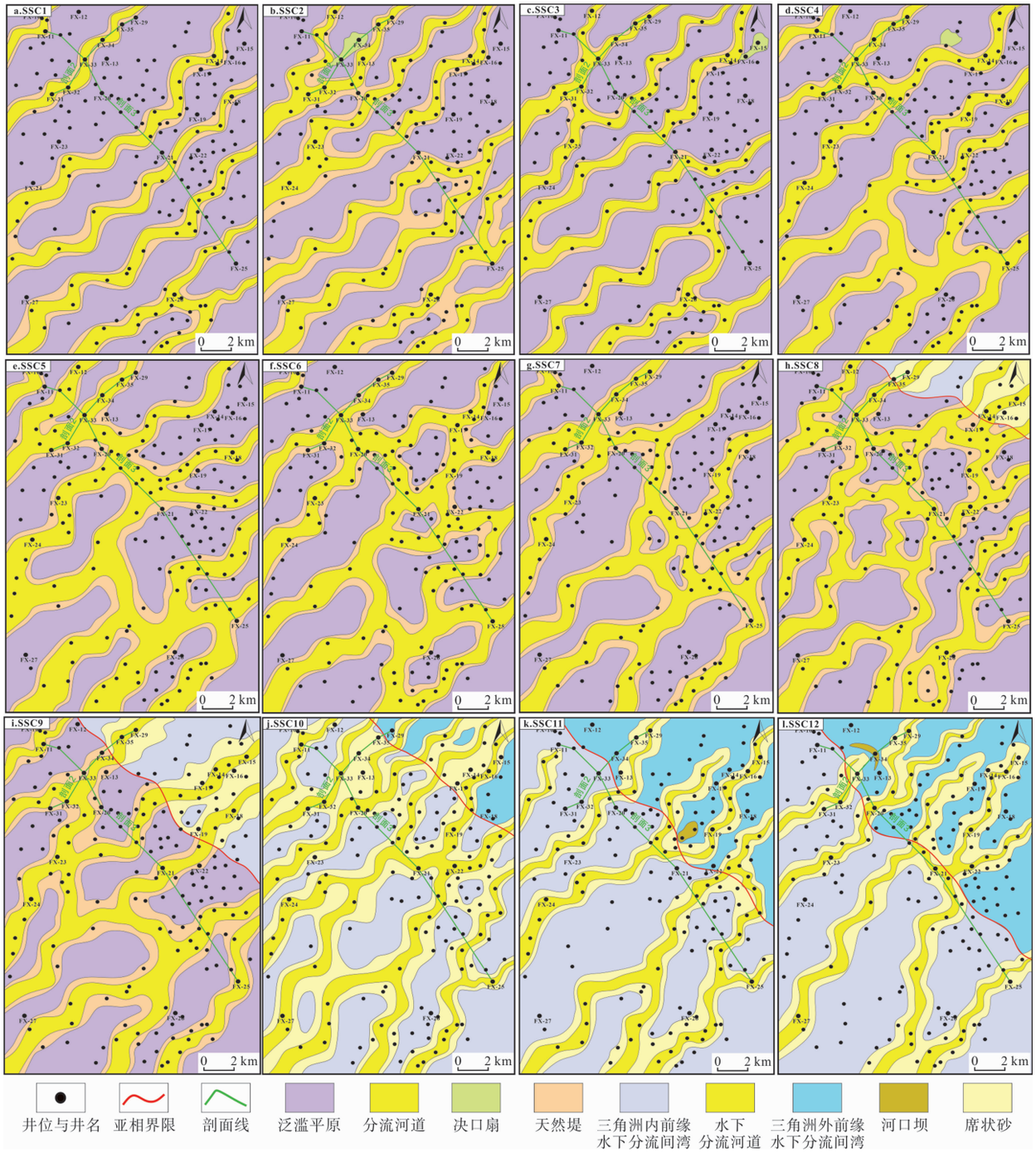


图 11 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层沉积微相平面展布

Fig. 11 Sedimentary microfacies distribution of the Fuyu oil layer in southern Fuxin uplift zone of Songliao Basin

窄，分流河道砂体近网状展布，且平面上复合河道宽度较宽。

SSC7-SSC9 沉积时期(图 11-g 至 11-i)，基准面缓慢上升，由三角洲平原逐渐演变为三角洲前缘，平原上发育多条同期活跃的高弯曲度分流河道，呈网状分布，整体规模相对较小，平原上天然堤沿分流河道呈近条带状展布，前缘中席状砂呈片状铺成。

SSC10-SSC12 沉积时期(图 11-j 至 11-l)，基准面上升速率不断加快，由三角洲内前缘逐渐演变

为外前缘，水下分流河道由近网状向条带状转变并逐渐歼灭，且自内前缘向外前缘逐渐发生大面积的席状砂化，河口坝发育，平面呈新月形和圆形。

4.3　沉积模式

扶余油层沉积时期，松辽盆地整体进入稳定拗陷期沉积，地貌微起伏，由前期沉积的曲流河供源，古水流与古地貌耦合控制，形成浅水曲流河三角洲沉积体系(图 12)。在低可容空间、坡度较小地形下，湖水反复振荡，使得曲流河在洪水面之上流动较长距离，有利于分流河道砂体的发育，部分区域可见决口扇，泛滥平原多发育，平面上分流河道两侧天然堤呈条带状沉积。由于曲流河分支河道入湖后水动力不足，三角洲前缘发育规模小，河流分叉指数相对较高且侧向迁移明显。随着沉积水体相对加深，且湖面的频繁波动，河流、波浪和沿岸流等的冲刷对已有沉积物产生再改造作用，在三角洲外前缘中可见水下分流河道发生较为强烈的席化，在水下分流河道分叉处还可发育有河口坝沉积或被后期冲刷遗留下的河口坝边缘沉积，形状呈新月形和圆形。

扶新隆起带南部扶余油层沉积的浅水曲流河三角洲沉积，为水体反复振荡下的低可容空间水进沉积，沉积初期，分流河道砂体呈条带状展布，后期随水动力减弱，分流河道/水下分流河道砂体呈网状展布，连续性均较好，为油气勘探的有利目标。松辽盆地白垩系青山口组为几乎覆盖全区的良好烃源岩层位，其生成的油气主要通过断裂沟通运移到下伏扶余油层分流河道和水下分流河道砂体中，易于形成岩性油气藏、构造—岩性油气藏等，论文针对浅水曲流河三角洲沉积特征与模式的研究，可为此类油气藏挖潜提供沉积理论支撑。

5　结论

1）基于 INPEFA 技术和色度指数定量分析，结合岩心沉积界面识别标志（冲刷面、滞留沉积），在松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层识别出 4 个四级层序（中期；MSC1-MSC4）和 13 个五级层序（短期；SSC1-SSC13），MSC1 和 MSC2 沉积时期以水退为主，前者等时地层厚度变化微小，后者等时地层增厚，MSC3 沉积时期以水进为主，等时地层厚度略微减薄，MSC4 沉积时期持续水进后短暂水退，等时地层厚度主要呈下伏地层的继承性变化。

2）浅水曲流河三角洲沉积，划分为三角洲平原、三角洲内前缘、三角洲外前缘亚相。平原分流河道砂体为骨架砂体，以厚层泥岩间隔的完整“二元结构”河道砂体和多期边滩被破坏形成的河道砂体叠置为特征。前缘水下分流河道为骨架砂

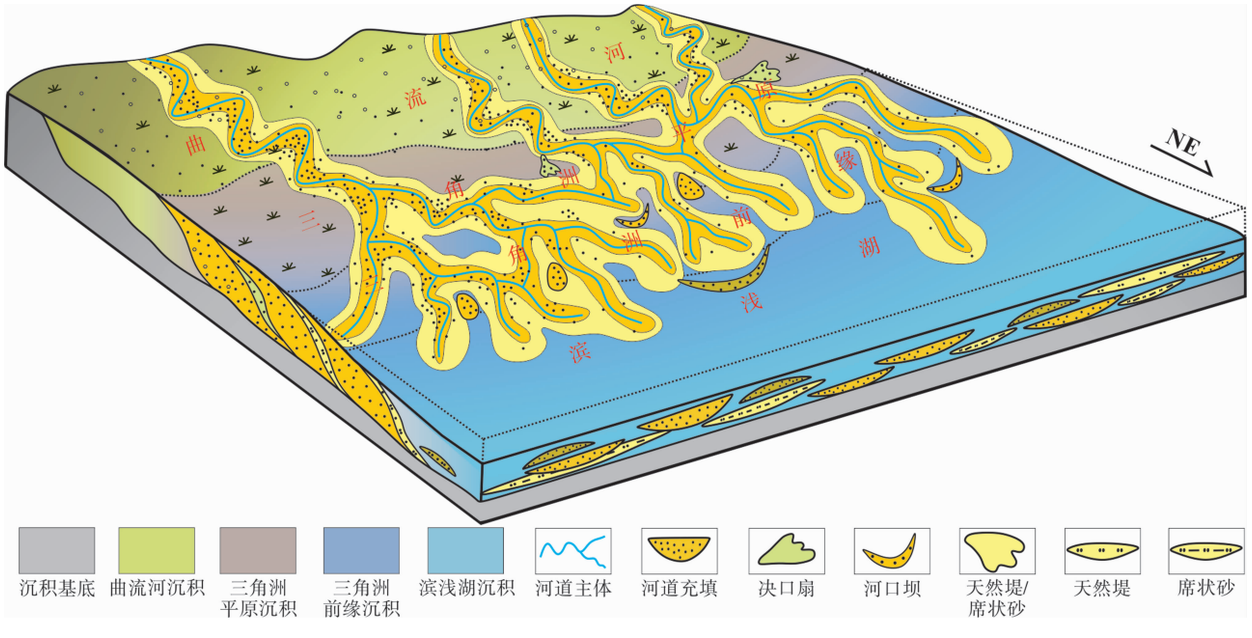


图 12　松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层浅水曲流河三角洲沉积模式

Fig. 12　Shallow-water meandering river delta sedimentary model of the Fuyu oil layer in southern Fuxin uplift zone of Songliao Basin

体，以厚度较薄的“砂冲砂”和厚度相对较厚的“砂冲泥”序列为特征。

3）基准面的高频升降控制浅水三角洲平原至前缘的相带迁移。快速升降期（SSC1-SSC6）形成多期垂向叠置，横向连通的分流河道砂体，平面上分流河道由窄条带状演变为稳定网状，发育泛滥平原、决口扇和沿河道两侧沉积的天然堤微相。持续上升期（SSC7-SSC12）实现三角洲平原—内前缘—外前缘的逐渐过渡，前缘薄层砂体孤立分布，河口坝呈圆形或新月形分布于河口处。基准面下降期（SSC13）发育连片席状砂，水下分流河道砂体较为连续。

致谢 感谢中国石油吉林油田分公司勘探开发研究院为论文提供了充足的资料支撑。感谢多位审稿专家提出的修改建议。

参考文献(References)

曹军,乔向阳,贺永红,周进松,杜永慧,王玺童,田坤,赵子丹,朱耿博仑,罗顺社. 2024. 鄂尔多斯盆地延安地区山西组山 2 段浅水曲流河三角洲沉积模拟实验研究. 沉积学报,42(5): 1685-1698. [Cao J,Qiao X Y,He Y H,Zhou J S,Du Y H,Wang X T,Tian K,Zhao Z D,Zhu G B L,Luo S S. 2024. Simulation experiment of shallow meandering river delta sedimentation in the 2nd member of the shanxi formation in Yan'an,Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica,42(5): 1685-1698]

陈少军,董清水,宋立忠,赵占银,丁悦宽. 2006. 松辽盆地南部泉四段沉积体系再认识. 大庆石油地质与开发,(6): 4-8,119. [Chen S J,Dong Q S,Song L Z,Zhao Z Y,Ding Y K. 2006. Recognition of sedimentary system of Quan-4 Member in south Songliao Basin. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,(6): 4-8,119]

冯晗,薛成,段健,张旭光,李晓革,曲丽丽. 2023. 浅水辫状河三角洲前缘砂体分布特征研究及应用：以南堡凹陷 X 油田东一段为例. 石油地质与工程,37(1): 10-15. [Feng H,Xue C,Duan J,Zhang X G,Li X G,Qu L L. 2023. Sand body distribution characteristics and its application in shallow braided river delta front: an example from the first member of Dongyi Formation of X oilfield in Nanpu sag. Petroleum Geology and Engineering,37(1): 10-15]

冯文杰,吴胜和,张可,赵文凯,贾风娟. 2017. 曲流河浅水三角洲沉积过程与沉积模式探讨：沉积过程数值模拟与现代沉积分析的启示. 地质学报,91(9): 2047-2064. [Feng W J,Wu S H,Zhang K,Zhao W K,Jia F J. 2017. Depositional process and sedimentary model of meandering-river shallow delta: insights from numerical simulation and modern deposition. Acta Geologica Sinica,91(9): 2047-2064]

葛荣峰,张庆龙,王良书,解国爱,徐士银,陈娟,王锡勇. 2010. 松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换. 地质论评,56(2): 180-195. [Ge R F,Zhang Q L,Wang L S,Jie G A,Xu S Y,Chen J,Wang X Y. 2010. Tectonic evolution of Songliao Basin and the prominent tectonic regime transition in Eastern China. Geological Review,56(2): 180-195]

胡明毅,马艳荣,刘仙晴,王辉,王延奇. 2009. 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. 石油天然气学报,31(3): 13-17,13. [Hu M Y,Ma Y R,Liu X Q,Wang H,Wang Y Q. 2009. 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. Journal of Oil and Gas Technology,31(3): 13-17,13]

梁昌国,王志章,林承焰,刘沛玲,庞静. 2008. 松辽盆地扶余油田白垩系泉四段沉积微相研究. 西南石油大学学报(自然科学版),(2): 69-73,190. [Liang C G,Wang Z Z,Lin C Y,Liu P L,Pang J. 2008. Sedimentary microfacies of the Q4 Member of cretaceous in Fuyu Oilfield,Songliao Basin. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition,(2): 69-73,190]

刘招君,王东坡,刘立,刘万洙,王璞君,杜晓弟,杨光. 1992. 松辽盆地白垩纪沉积特征. 地质学报,66(4): 327-338. [Liu Z J,Wang D P,Liu L,Liu W Z,Wang P J,Du X D,Yang G. 1992. Sedimentary characteristics of the cretaceous songliao basin. Acta Geologica Sinica,66(4): 327-338]

楼章华,谢鸿森,蔡希源,王玉华,李本武. 1997. 松辽盆地扶杨油层($K1q^{3+4}$)沉积环境. 石油实验地质,(1): 71-75. [Lou Z H,Xie H S,Cai X Y,Wang Y H,Li B W. 1997. Sedimentary environments of Fuyang Oil Reservoir($K1q^{3+4}$) in Songliao Basin. Petroleum Geology & Experiment,(1): 71-75]

路顺行,张红贞,孟恩,孙效功. 2007. 运用 INPEFA 技术开展层序地层研究. 石油地球物理勘探,42(6): 703-708. [Lu S X,Zhang H Z,Meng E,Sun X G. 2007. Application of INPEFA technique to carry out sequence-stratigraphic study. Oil Geophysical Prospecting,42(6): 703-708]

蒙启安,白雪峰,梁江平,唐振国,薛涛,彭建亮. 2014. 松辽盆地北部扶余油层致密油特征及勘探对策. 大庆石油地质与开发,33(5): 23-29. [Qi A M,Bai X F,Liang J P,Tang Z G,Xue T,Peng J L. 2014. Fuyu tight oil characteristics and exploration countermeasures in north Songliao Basin. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,33(5): 23-29]

任丽华,代俊杰,林承焰,曹铮. 2017. 松辽盆地扶新隆起带南部青山口组超压特征及油气地质意义. 天然气地球科学,28(7): 1020-1030. [Ren L H,Dai J J,Lin C Y,Cao Z. 2017. Characteristics of overpressure and its geological significance for hydrocarbon of Qingshankou Formation in southern Fuxin Uplift,Songliao Basin. Natural Gas Geoscience,28(7): 1020-1030]

沈华,杨亮,韩昊天,王颖,邢济麟,薛松,刘红超. 2023. 松辽盆地南部油气勘探新领域、新类型及资源潜力. 石油学报,44(12): 2104-2121. [Shen H,Yang L,Han H T,Wang Y,Xin J L,Xue S,Liu H C. 2023. New fields,new types and resource potentials of oil-

gas exploration in southern Songliao Basin. Acta Petrolei Sinica, 44(12): 2104-2121]

孙靖,薛晶晶,吴海生,吴爱成,宋明星,贾开富. 2016. 远源、细粒型浅水三角洲沉积特征与演化：以准噶尔盆地腹部莫索湾地区八道湾组为例. 沉积学报,34(1): 129-136. [Sun J, Xue J J, Wu H S, Wu A C, Song M X, Jia K F. 2016. Distal fine-grain shallow-water delta sedimentary characteristics and evolution: a case from Badaowan Formation in the Central Junggar Basin. Acta Sedimentologica Sinica,34(1): 129-136]

孙雨,马世忠,张大智,赵慧,于利民,张永波. 2010. 源外岩性类油藏区油气聚集特征及其主控因素分析：以松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层为例. 地质论评,56(4): 531-537. [Sun Y, Ma S Z, ZhangD Z, Zhao H, Yu L M, Zhang Y B. 2010. The analysis of hydrocarbon accumulation characteristics and its main controlling factors in lithologic reservoirs area outside oil source area: example of Fuyu Oil Layer in the Southern Fuxin Uplift of Songliao Basin. Geological Review,56(4): 531-537]

孙雨,马世忠,丛琳,赵慧,于利民,付宪第. 2012. 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层沉积特征及沉积模式探讨. 沉积学报,30(4): 706-715. [Sun Y, Ma S Z, Cong L, Zhao H, Yu L M, Fu X D. 2012. Study on depositional characteristics and model of Fuyu Oil Layer in the Southern Fuxin Uplift of Songliao Basin. Acta Sedimentologica Sinica,30(4): 706-715]

王斌,邱岐,陆永潮,刘德志,王继远,杜学斌,李振明,李祥权. 2023. 准噶尔盆地腹部上二叠统—下三叠统浅水辫状河三角洲沉积特征与模式. 石油实验地质,45(4): 606-619. [Wang B, Qiu Q, Lu Y C, Liu D Z, Wang J Y, Du X B, Li Z M, Li X Q. 2023. Sedimentary characteristics and sedimentary model of the Upper Permian-Lower Triassic shallow braided river delta in the hinterland of the Junggar Basin. Petroleum Geology & Experiment,45(4): 606-619]

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. [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]

王梦琪,谢俊,王金凯,董运晓,王泽润,段雅君. 2016. 基于 INPEFA 技术的高分辨率层序地层研究：以埕北油田东营组二段为例. 中国科技论文,11(9): 982-987,994. [Wang M Q, Xie J, Wang J K, Dong Y X, Wang Z R, Duan J Y. 2016. Research of high resolution sequence stratigraphy using INPEFA: a case study in the second member of Dongying formation of Chengbei oilfield. China Science Paper,11(9): 982-987,994]

王璞珺,赵然磊,蒙启安,瞿雪姣,朱德丰,高有峰. 2015. 白垩纪松辽盆地：从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境. 地学前缘,22(3): 99-117. [Wang P J, Zhao R L, Meng Q A, Qu X J, Zhu D F, Gao Y F. 2015. The cretaceous Songliao Basin: dynamic background from volcanic rift to interior sag basin. Earth Science Frontiers,22(3): 99-117]

王小军,白雪峰,李军辉,金之钧,王贵文,陈方举,郑强,侯艳平,杨庆杰,李杰,李君文,蔡俣. 2024. 松辽盆地北部下白垩统扶余油层源下致密油富集模式及主控因素. 石油勘探与开发,51(2): 248-259. [Wang X J, Bai X F, Li J H, Jin Z J, Wang G W, Chen F J, Zheng Q, Hou Y P, Yang Q J, Li J, Li J W, Cai Y. 2024. Enrichment model and major controlling factors of below-source tight oil in Lower Cretaceous Fuyu reservoirs in northern Songliao Basin, NE China. Petroleum Exploration and Development,51(2): 248-259]

徐蒙,王家豪,徐东浩,宋广增,赵宝峰. 2013. 苏里格气田苏 120 区块盒 8 段浅水辫状河三角洲砂体演化规律. 沉积学报,31(2): 340-349. [Xu M, Wang J H, Xu D H, Song G Z, Zhao B F. 2013. The sandbody evolution of shallow water braided river deltas in the eighth Member of Shihezi Formation in Block Su 120, Sulige Gas Field. Acta Sedimentologica Sinica,31(2): 340-349]

易定红,石亚军,刘俊丰,刘应如,李积永,王爱萍,马元坤,李红哲,贾正良. 2024. 柴达木盆地南八仙地区渐新世浅水三角洲物源及沉积演化. 地质学报,98(2): 494-510. [Yi D H, Shi Y J, Liu J F, Liu Y R, Li J Y, Wang A P, Ma Y K, Li H Z, Jia Z L. 2024. Provenance analysis and sedimentary evolution of Oligocene shallow water delta in the Nanbaxian area, northern Qaidam Basin. Acta Geologica Sinica,98(2): 494-510]

曾洪流,赵贤正,朱筱敏,金凤鸣,董艳蕾,王余泉,朱茂,郑荣华. 2015. 隐性前积浅水曲流河三角洲地震沉积学特征：以渤海湾盆地冀中坳陷饶阳凹陷肃宁地区为例. 石油勘探与开发,42(5): 566-576. [Zeng H L, Zhao X Z, Zhu X M, Jin F M, Dong Y L, Wang Y Q, Zhu M, Zheng R H. 2015. Seismic sedimentology characteristics of sub-clinoformal shallow-water meandering river delta: a case from the suning area of raoyang sag in Jizhong depression, Bohai Bay Basin, NE China. Petroleum Exploration and Development,42(5): 566-576]

张莉,鲍志东,林艳波,陈玉明,林晓海,窦鲁星,孔彬. 2017. 浅水三角洲砂体类型及沉积模式：以松辽盆地南部乾安地区白垩系姚家组一段为例. 石油勘探与开发,44(5): 727-736. [Zhang L, Bao Z D, Lin Y B, Chen Y M, Lin X H, Dou L X, Kong B. 2017. Genetic types and sedimentary model of sandbodies in a shallow-water delta: a case study of the first Member of Cretaceous Yaojia Formation in Qian'an area, south of Songliao Basin, NE China. Petroleum Exploration and Development,44(5): 727-736]

张庆国,鲍志东,郭雅君,孙继武,何莹. 2007. 扶余油田扶余油层的浅水三角洲沉积特征及模式. 大庆石油学院学报,31(3): 4-7,14,148. [Zhang Q G, Bao Z D, Guo Y J, Sun J W, He Y. 2007. Sedimentary characteristics and model of the Fuyu oil-bearing reservoir in Fuyu oil field. Journal of Northeast Petroleum University, 31(3): 4-7,14,148]

张鑫. 2011. 松辽盆地南部泉四段物源判别与沉积特征. 大庆石油学院学报,35(5): 16-21,114. [Zhang X. 2011. Provenance discrimination and sedimentary characteristics of the fourth member of Quanquan in the southern part of Songliao Basin. Journal of Northeast Petroleum University,35(5): 16-21,114]

张义娜,朱筱敏,孙作兴. 2011. 中亚南部湖盆浅水辫状河三角洲识别标志与沉积模式研究. 石油天然气学报,33(7): 28-31,5.

[Zhang Y N, Zhu X M, Sun Z X. 2011. Identification marks and sedimentary mode of shallow braided river delta in the South of Central Asia. Journal of Oil and Gas Technology, 33(7): 28-31, 5]

朱茂, 朱筱敏, 曾洪流, 董艳蕾, 刘畅, 郑荣华. 2017. 冀中坳陷饶阳凹陷浅水曲流河三角洲沉积体系: 以赵皇庄—肃宁地区沙一段为例. 岩性油气藏, 29(2): 59-67. [Zhu M, Zhu X M, Zeng H L, Dong Y L, Liu C, Zheng R H. 2017. Depositional system of shallow-water meandering river delta: a case from the first member of Shahejie Formation in Zhaohuangzhuang-Suning area of Raoyang sag, Jizhong Depression. Lithologic Reservoirs, 29(2): 59-67]

朱筱敏. 2000. 层序地层学. 北京: 中国石油大学出版社, 147-56. [Zhu X M. 2000. Sequence Stratigraphy. Beijing: China University of Petroleum Press, 147-156]

朱筱敏, 刘媛, 方庆, 李洋, 刘云燕, 王瑞, 宋静, 刘诗奇, 曹海涛, 刘相男. 2012. 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. 地学前缘, 19(1): 89-99. [Zhu X M, Liu Y, Fang Q, Liu Y, Li Y Y, Wang R, Song J, Liu A Q, Cao H T, Liu X N. 2012. Formation and sedimentary model of shallow delta in large-scale lake: example from Cretaceous Quantou Formation in Sanzhao sag, Songliao Basin. Earth Science Frontiers, 19(1): 89-99]

朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 孙勃, 廖纪佳, 惠潇. 2013. 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. 地学前缘, 20(2): 19-28. [Zhu X M, Deng X Q, Liu Z L, Sun B, Liao J J, Hui X. 2013. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in largedscale lacustrine: an example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. Earth Science Frontiers, 20(2): 19-28]

朱筱敏, 叶蕾, 谢爽慧, 杨棵, 秦祎. 2023. 低可容空间陆相湖盆富砂浅水三角洲沉积模式及实例分析. 古地理学报, 25(5): 959-975. [Zhu X M, Ye L, Xie S H, Yang K, Qing Y. 2023. Sedimentary models and case study of sand-rich shallow-water delta in continental lacustrine basins with low accommodation. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 25(5): 959-975]

邹才能, 赵文智, 张兴阳, 罗平, 王岚, 刘柳红, 薛叔浩, 袁选俊, 朱如凯, 陶士振. 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, (6): 813-825. [Zou C N, Zhao W Z, Zhang X Y, Luo P, Wang L, Liu L H, Xue S H, Yuan X J, Zhu R K, Tao S Z. 2008. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basin. Acta Geologica Sinica, (6): 813-825]

Cross T A. 1988. Controls on coal distribution in transgressive-regressive cycles, Upper Cretaceous, Western Interior, USA. Tulsa: SEPM Special Publiction: 371-380.

Deng Q J, Hu M Y, Su S, Chen W, Shen J, Kane O I, Cai Q S, Hu Z G. 2022. Factors controlling reservoir quality of a retreating delta-front in shallow-water lacustrine in the Songliao Basin, Northeast China. Journal of Petroleum Science and Engineering, 216: 110773.

Lemons D R, Chan M A. 1999. Facies Architecture and Sequence Stratigraphy of Fine-Grained Lacustrine Deltas Along the Eastern Margin of Late Pleistocene Lake Bonneville, Northern Utah and Southern Idaho. AAPG Bulletin, 83(4): 635-665.

Nio S D, Brouwer J H, Smith D, Jong M D, Böhm A R. 2005. Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of wireline logs. First Break, 23(4): 71-75.

Reynolds A D. 2022. Variability in fluvially-dominated, fine-grained, shallow-water deltas. Sedimentology, 69(7): 2779-2813.

Wang C S, Feng Z Q, Zhang L M, Huang Y J, Cao K, Wang P J, Zhao B. 2013. Cretaceous paleogeography and paleoclimate and the setting of SK1 borehole sites in Songliao Basin, northeast China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 385: 17-30.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐 杰)