

干旱型浅水三角洲沉积特征及沉积模式

——以准噶尔盆地腹部永进地区侏罗系齐古组为例

宋 璠¹,孔庆圆¹,张学才²,曹海防²,焦国华³,杨 悦¹

[1. 深层油气全国重点实验室(中国石油大学(华东),山东 青岛 266580;2. 中国石化 胜利油田分公司 西部油气勘探项目部,山东 东营 257017;3. 中国石化 新疆新春石油开发有限责任公司,山东 东营 257017]

摘要:浅水三角洲是沉积学研究领域的热点,但是干旱气候背景、水体间歇振荡、沉积特征与沉积过程较为复杂的浅水三角洲研究报道较少。综合利用岩心、测井、分析化验和地震等资料,根据现代沉积分析与沉积数值模拟,对准噶尔盆地腹部永进地区侏罗系齐古组开展系统的沉积相研究,建立了齐古组沉积模式。研究表明:①中-晚侏罗世准噶尔盆地气候转为干旱,齐古组沉积水体变浅且频繁振荡,1砂组—3砂组发育浅水辫状河三角洲沉积,4砂组物源供给减弱、气候持续干旱,沉积相转变为曲流河三角洲。②与湿润气候背景下的浅水三角洲相比干旱型浅水三角洲,水下分流河道变化较快,随着河道延伸逐渐分叉、改道出多种类型的河道砂。三角洲砂体颜色呈红灰间互的变化规律,砂岩岩性较细、成熟度低、分布规模不大。持续干旱的气候条件导致湖盆可容空间不断减小,三角洲朵叶体中几乎不发育河口砂坝,沉积砂体主要为多种形态类型的水下分流河道砂。③单一供给河道控制的沉积体规模有限且顺水流方向分异明显,发育高能水下主干河道、中-高能网状分流河道和低能改造型分流河道3种沉积微相。单砂体间连通性较差、储集空间非均质性强,油气勘探开发难度大。

关键词:干旱气候;沉积模式;浅水三角洲;齐古组;侏罗系;永进地区;准噶尔盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sedimentary characteristics and models of shallow-water deltas in arid settings: A case study of the Jurassic Qigu Formation in the Yongjin area within the hinterland of the Junggar Basin

SONG Fan¹, KONG Qingyuan¹, ZHANG Xuecai², CAO Haifang², JIAO Guohua³, YANG Yue¹

[1. State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Western Oil and Gas Exploration Project Department, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257017, China; 3. Xinjiang Xinchun Petroleum Development Co., Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257017, China]

Abstract: Shallow-water deltas represent a hot research topic in sedimentology. However, there is a lack of studies and reports on shallow-water deltas featuring an arid climate, intermittently oscillating water bodies, and complex sedimentary characteristics and processes. Using data from core observation, logging, analyses, assays, and seismic surveys, along with modern analogs and sedimentary numerical simulations, we systematically investigate the sedimentary facies of the Jurassic Qigu Formation (J_3q) in the Yongjin area within the hinterland of the Junggar Basin. Accordingly, the sedimentary models of the shallow-water deltas formed in arid settings (also referred to as arid shallow-water deltas) in the J_3q are established. The results indicate that as the Junggar Basin's climate grew to be arid during the Middle-to-Late Jurassic, the sedimentary water bodies in the J_3q became shallow and oscillated frequently. Consequently, shallow-water braided river deltas were deposited in sand sets 1–3 of this formation. In contrast, the sedimentary facies of sand set 4 of the formation shifted to meandering-river deltas due to reduced provenance supply and persistent drought. In contrast, shallow-water deltas formed in a humid climate frequently feature rapidly varying subaqueous distributary channels, with various channel sand sets coming into being as the channels gradually bifurcated and diverted while extending. These

收稿日期:2024-03-18;修回日期:2024-07-17。

第一作者简介:宋璠(1982—),男,博士、副教授,沉积储层、油藏描述。E-mail:songfan0026@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41702158);山东省自然科学基金项目(ZR2022MD014)。

deltaic sand bodies display alternating red and gray colors, with sandstones proving fine-grained, low-maturity, and locally distributed. Persistent drought leads to a constant decrease in the lacustrine basin accommodation space. As a result, mouth sandbars are rarely found in the deltaic lobes, and the sedimentary sand bodies are dominated by subaqueous distributary channel sands of various morphologies. The sedimentary bodies with single-channel provenance supply exhibit limited scales and pronounced lithofacies differentiation along water flow directions, leading to the development of three sedimentary microfacies: high-energy subaqueous trunk channels, medium- to high-energy reticular distributary channels, and low-energy modified distributary channels. The low connectivity among individual sand bodies and the strong heterogeneity of storage spaces complicate the hydrocarbon exploration and production in arid shallow-water deltas.

Key words: arid climate, sedimentary model, shallow-water delta, Qigu Formation (J_3q), Jurassic, Yongjin area, Junggar Basin

引用格式:宋璠,孔庆圆,张学才,等.干旱型浅水三角洲沉积特征及沉积模式——以准噶尔盆地腹部永进地区侏罗系齐古组为例[J].石油与天然气地质,2024,45(5):1275–1288. DOI:10.11743/ogg20240506.

SONG Fan, KONG Qingyuan, ZHANG Xuecai, et al. Sedimentary characteristics and models of shallow-water deltas in arid settings: A case study of the Jurassic Qigu Formation in the Yongjin area within the hinterland of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1275–1288. DOI:10.11743/ogg20240506.

浅水三角洲是沉积学研究领域的热点之一^[1-3]。在中国,现代浅水湖泊三角洲十分常见,如鄱阳湖、洞庭湖等均发育典型的浅水三角洲。随着油气勘探领域的逐步扩大,许多浅水三角洲成因的油气储层也相继被发现,例如准噶尔盆地玛湖凹陷克拉玛依组、江汉盆地潜江凹陷潜江组、松辽盆地大安地区姚家组等^[4-6]。目前关于浅水三角洲的形成背景、内部结构、分布样式等方面的研究取得了长足的进展,形成了较为统一的认识:即浅水三角洲主要形成于古地形平缓、古气候湿润、古水动力稳定的拗陷型湖盆边缘,以分支河道沉积为主体,河口坝被强烈改造而发育程度低^[7-9]。学者们针对不同勘探对象建立起了具有区域特色的浅水三角洲沉积模式^[10-12]。从已有成果报道来看,关于浅水三角洲沉积特征及沉积模式的研究实例多具有湿润气候背景、长期稳定的水流、沉积过程稳定、河道类型单一的特征,而对于干旱气候背景、水体间歇振荡、沉积特征与沉积过程较为复杂的浅水三角洲研究报道相对较少。

准噶尔盆地是中国第二大内陆盆地,盆地划分为5个一级构造带和46个二级构造单元^[13]。经过多年的油气勘探实践,盆地周缘地层-构造型的油气田勘探已成熟,盆地腹部深层岩性油气藏逐渐成为勘探焦点^[14-15]。近年来在准噶尔盆地腹部车-莫古隆起附近的侏罗系相继发现了多个油气田,其中储量规模最大的是位于古隆起南翼的永进油田,其侏罗系齐古组控制储量 $3\ 200\times 10^4\text{ t}$,勘探潜力巨大^[16-18]。笔者综合岩心、测井、地震等分析手段,配合现代沉积分析与沉积数值模拟,对永进地区齐古组开展系统的沉积相研究,发现齐古组发育典型的干旱气候背景下的浅水三角洲

沉积砂体,进而对该浅水三角洲的沉积特征与分布规律开展研究,建立干旱型浅水三角洲沉积模式,以期对永进油田的下步勘探评价工作提供参考。

1 区域地质概况

准噶尔盆地位于中国新疆北部,是晚古生代以来形成的多期叠合盆地,石炭系—新近系发育较为齐全^[19]。永进地区位于准噶尔盆地腹部车-莫古隆起南翼,属于盆地腹部中央拗陷的一个二级正向构造单元(图1a)。车-莫古隆起在侏罗纪末期剧烈抬升,永进地区遭受了大范围剥蚀,主要残留了中-上侏罗统的齐古组(J_3q)和西山窑组(J_2x)(图1c),与上覆白垩系清水河组(K_1q)呈不整合接触^[20-21]。自2003年胜利油田部署的永1井在侏罗系齐古组获得油气突破以来,先后有多口井获得良好的油气显示,展现了该区齐古组良好的勘探前景^[22]。依据岩性组合、沉积旋回特征及含油性,齐古组自下而上被分为4个砂层组,其中1砂组—3砂组是主要含油层段(图2)。目前区内钻穿齐古组的井有30余口(图1b),其中取心井有16口,基础资料丰富。

永进地区齐古组整体呈南倾的单斜,构造平缓,地层坡度约为 3° 。古生物资料表明研究区西山窑组蕨类和裸子孢粉丰富,而齐古组孢粉化石很少,结合黏土矿物中高岭石含量低、伊利石与绿泥石含量高的特点^[23],反映出齐古组经受的风化淋滤弱,沉积时古气候转为干旱。在上述古构造与古气候背景下,车-莫古隆起抬升剥蚀形成的碎屑物质向南逐层推进,形成了多套近源分布的三角洲沉积砂体^[24-25]。

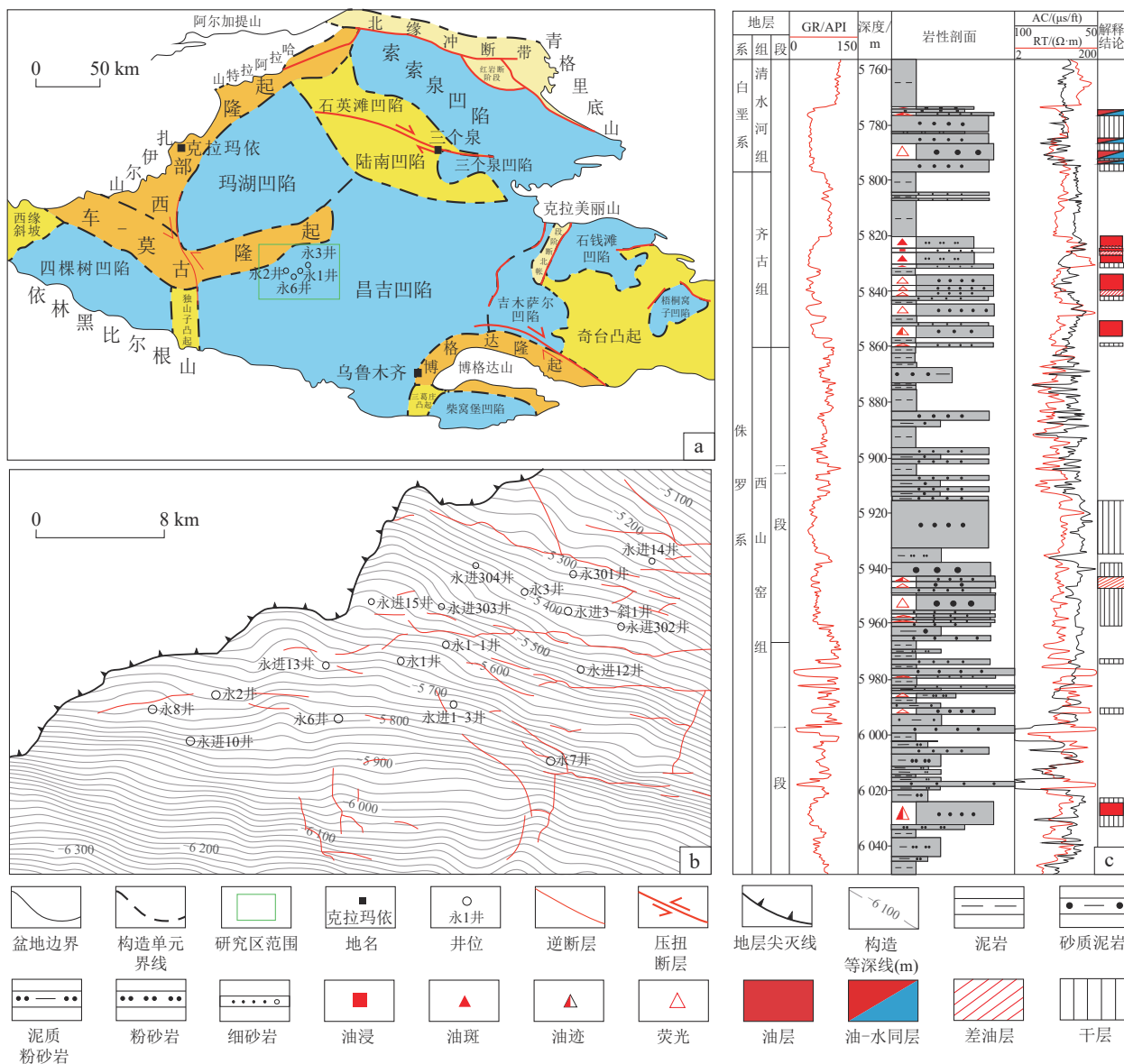


图1 准噶尔盆地永进地区构造位置(a)、齐古组构造(b)及地层柱状图(c)

Fig. 1 Tectonic location (a), Qigu Formation (J_{3q}) structure (b), and stratigraphic column (c) of the Yongjin area, Junggar Basin

2 沉积特征及相类型

通过对永进地区16口取心井355 m岩心进行描述,结合地球物理特征及沉积学实验,对齐古组的浅水三角洲沉积特征进行研究,划分沉积微相类型,总结其发育分布规律。

2.1 沉积相标志

2.1.1 岩性特征

永进地区齐古组整体呈多套正旋回叠加的退积型沉积样式,下部以灰色含砾中-粗砂岩为主,夹薄层红

褐色细砂岩与泥岩,向上逐渐过渡为红褐色泥岩夹薄层粉砂岩(图2)。

砂岩作为齐古组最主要的岩石类型,其岩性主要为长石岩屑砂岩,其中石英含量20%~40%,长石含量10%~39%,岩屑含量30%~91%,塑性岩屑含量较高。砂岩颜色以灰色为主,受含油性影响可见灰褐色、深灰色砂岩(图3a,b),垂向上呈多期叠加的正粒序,单层底部冲刷现象明显(图3c,d),反粒序少见;岩心上平行层理十分发育,可见少量板状、楔状交错层理与波状层理(图3e,g)。部分井段发育红褐色中-细砂岩(如永12井),泥质含量高,不含油,层理不发育,生物扰动现象明显(图3h)。砾岩多为细砾顺层排列形成,砾石以单成分灰色泥砾为主(图3i),分选磨圆较好,单层

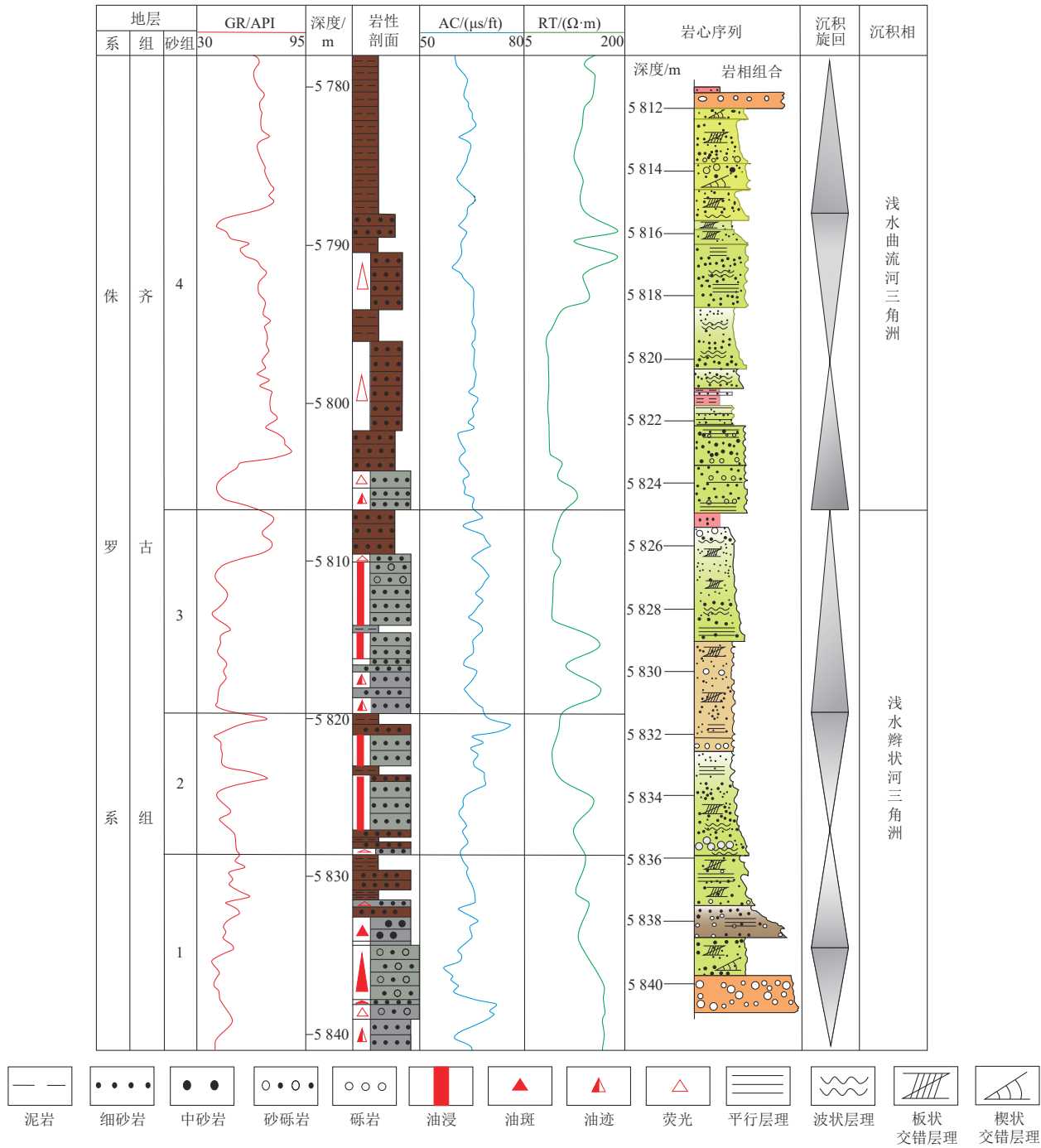


图2 准噶尔盆地永进1-1井齐古组地层划分及岩性特征

Fig. 2 Stratigraphic division and lithologic characteristics of the J_{3q} in well YJ-1-1 in the Junggar Basin

底部可见少量复成分细砾。泥岩以红褐色泥岩为主，可见少量深灰色泥岩与之交替出现(图3j)。上述岩性特征表明永进地区齐古组三角洲沉积过程受到湖水水位控制，红褐色与深灰色的交替出现反映了沉积水体的深浅变化，沉积物总体形成于浅水弱还原环境中，当水位较低时沉积物易暴露于水面遭受氧化。

优选齐古组60余块砂岩样品进行沉积物粒度分析，由粒度累积概率曲线(图4a)可以看出，各取心井

的曲线均为高斜率跳跃悬浮二段式，跳跃组分约占75%，悬浮组分约为25%。其中跳跃次总体倾角约为60°，分选较好，悬浮次总体分选相对较差。跳跃和悬浮次总体粒级交截点粒径 Φ 值为2.5~3.5，中-细砂碎屑颗粒的比率远大于极细-粉砂，总体粒度较粗，代表较强的河道水动力特征。C-M图[C为累积曲线上颗粒含量1%处对应的粒径(最大粒径)；M为累积曲线上50%处对应的粒径(平均粒径)]中样品点主要出

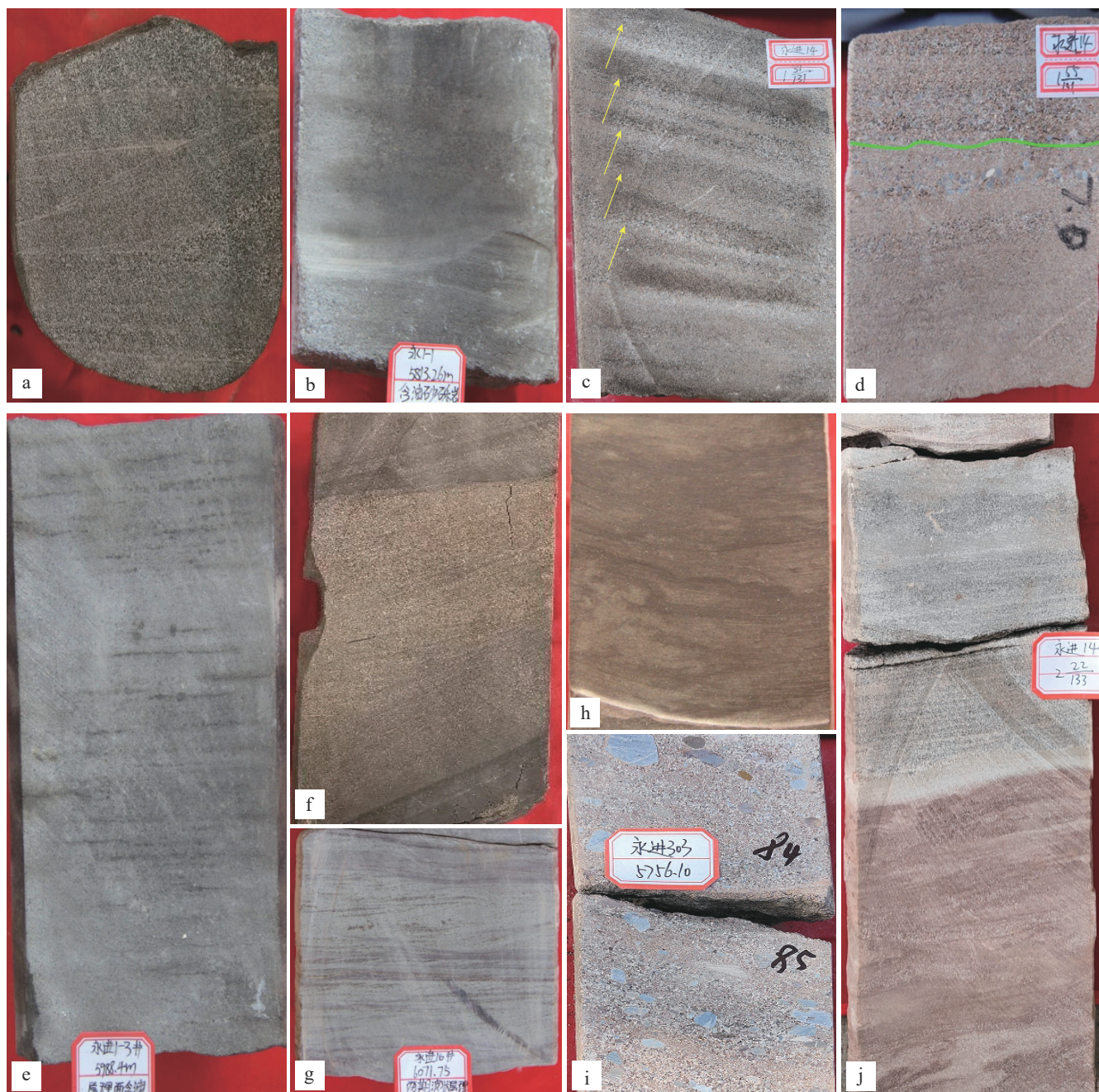


图3 准噶尔盆地永进地区齐古组岩心典型沉积现象照片

Fig. 3 Photos showing the typical sedimentary phenomena in cores from the J_{3q} in the Yongjin area, Junggar Basin

- a. 灰褐色含油砂岩,永进1-3井,埋深5 991.8 m;b. 深灰色含油砂砾岩,永进1-1井,埋深5 813.3 m;c. 多期正粒序叠加,永进14井,埋深5 488.3 m;
d. 冲刷面,永进14井,埋深5 491.6 m;e. 平行层理,层理面含油,永进1-3井,埋深5 988.4 m;f. 楔状交错层理,永进3-斜17井,埋深5 714.0 m;
g. 波状层理,永进10井,埋深6 071.8 m;h. 红褐色细砂岩,具生物扰动,永进12井,埋深5 776.8 m;i. 泥砾定向排列,永进303井,埋深5 750.1 m;
j. 颜色韵律层,永进14井,埋深5 505.3 m

现在PQ段(图4b),符合牵引流特征,颗粒越向下游滚动组分越少,反映水动力较强且搬运距离短。

2.1.2 岩相组合

根据永进地区齐古组岩石的岩性、砾石产状、颜色和沉积构造等特征,划分出砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩

4大类岩相,包括14小类岩相类型(表1),总结了各类岩相的分布特征及其常见的组合关系。

永进地区齐古组1砂组—3砂组的岩相类型以平行层理中—粗砂岩相、冲刷侵蚀中—细砂岩相为主,平行层理粉砂岩相和顺层定向排列中—细砾岩相次之,常见这几类岩相构成的垂向组合序列(图5a—c);4砂

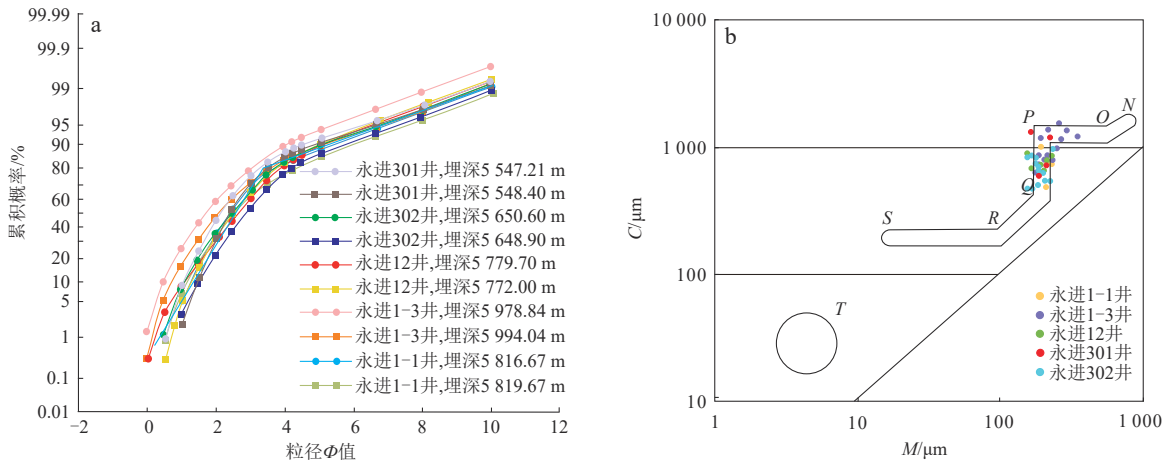


图4 准噶尔盆地永进地区齐古组砂岩粒度累积概率曲线(a)与C-M图(b)

Fig. 4 Particle-size probability cumulative curves and C-M plots of sandstones in the J₃q in the Yongjin area, Junggar Basin
(C为最大粒径;M为平均粒径。)

表1 准噶尔盆地永进地区齐古组岩相类型特征

Table 1 Lithofacies types and distributions in the J₃q in the Yongjin area, Junggar Basin

岩相类型		分布特征
大类	小类	
砾岩相	顺层定向排列中-细砾岩相	分布于正韵律底部冲刷面附近
	杂乱分布细砾岩相	分布于单层底部,侵蚀下部泥岩
砂岩相	平行层理中-粗砂岩相	砂岩中最常见的岩相类型
	板状交错层理中-细砂岩相	偶见于正韵律砂体上部
	冲刷侵蚀中-细砂岩相	常见于单期正韵律下部
	块状构造细砂岩相	红褐色砂岩中常见,泥质含量高
	富生物扰动块状细砂岩相	见于南部、东部红褐色砂岩之中
	富泥砾中-粗砂岩相	偶见于正韵律砂体底部
粉砂岩相	平行层理粉砂岩相	见于薄砂层顶部,可见顺层泥砾
	楔状交错层理粉砂岩相	见于粉砂岩变为泥岩的界面处
	波状层理粉砂岩相	常见于粉砂岩夹层之中
	软沉积变形粉砂岩相	偶见于粉砂岩夹层之中
泥岩相	红褐色块状泥岩相	常见于齐古组上部厚层稳定泥岩
	灰色夹粉砂质条带泥岩相	常见于厚层砂岩中的泥质隔夹层

组以红褐色块状泥岩相为主,常与块状构造细砂岩相、波状层理粉砂岩相组合(图5d)。

2.1.3 地球物理特征

由于永进地区齐古组埋深大于5 500 m,属于低孔渗致密储层,自然电位和声波时差曲线的沉积响应不明显,主要采用自然伽马测井值(GR)与深感应电阻率(RT)进行测井相分析。整体来看,齐古组1砂组—3砂组储层电性主要呈厚层块状箱形与中-厚层齿化箱形(表2),反映了较强水动力条件下砂体不断冲刷、叠置的沉积特点,部分井段可见少数齿化钟形、低幅指形

与齿形。4砂组的测井曲线以平直段或低幅齿形为主,偶见小型钟形或漏斗形。典型湿润气候背景下的浅水三角洲平原与前缘中,砂层中常夹有部分煤层,GR由于煤层的强吸附能力而呈异常高幅^[26],这与研究区干旱型三角洲形成了明显对比。

利用2020年处理的高分辨率三维地震数据进行层位追踪,发现永进地区齐古组分布范围较局限,下伏西山窑组各砂组逐层向上倾方向抬升遭受剥蚀,形成明显的角度不整合,剥蚀线呈近北东方向展布(图6)。由于西山窑组发育多套厚煤层,地震同相轴反射很强,受其影响齐古组层间振幅属性无法反映真实砂体形态,表现在西北部煤层出露区振幅极强,齐古组砂体向南分布被多条剥蚀线区的低振幅带分割(图6)。鉴于此,利用中国石化新春公司最新的叠后提频地震数据,以精细小层格架为约束建立反演低频模型,井-震联合高分辨率反演,精细描述齐古组砂体的边界。反演结果显示永进地区齐古组发育的两支三角洲主河道向南推进(图7),分别为中部永1-1井—永1-3井主水道和东部永进14井—永进12井主水道,二者之间存在明显的岩性变化带,2022年完钻的永进304井证实存在河道间的泥岩沉积。

2.2 沉积相类型

基于永进地区齐古组的沉积背景与各类沉积相标志,结合现代浅水三角洲沉积特征,优选参数进行沉积数值模拟,综合分析厘定沉积相与沉积微相类型。永进地区齐古组古构造平缓、古气候干旱、沉积水体浅且频繁振荡,车-莫古隆起剥蚀产物向南搬运易于形成近源浅水三角洲沉积。结合前述岩石相组合与地球物

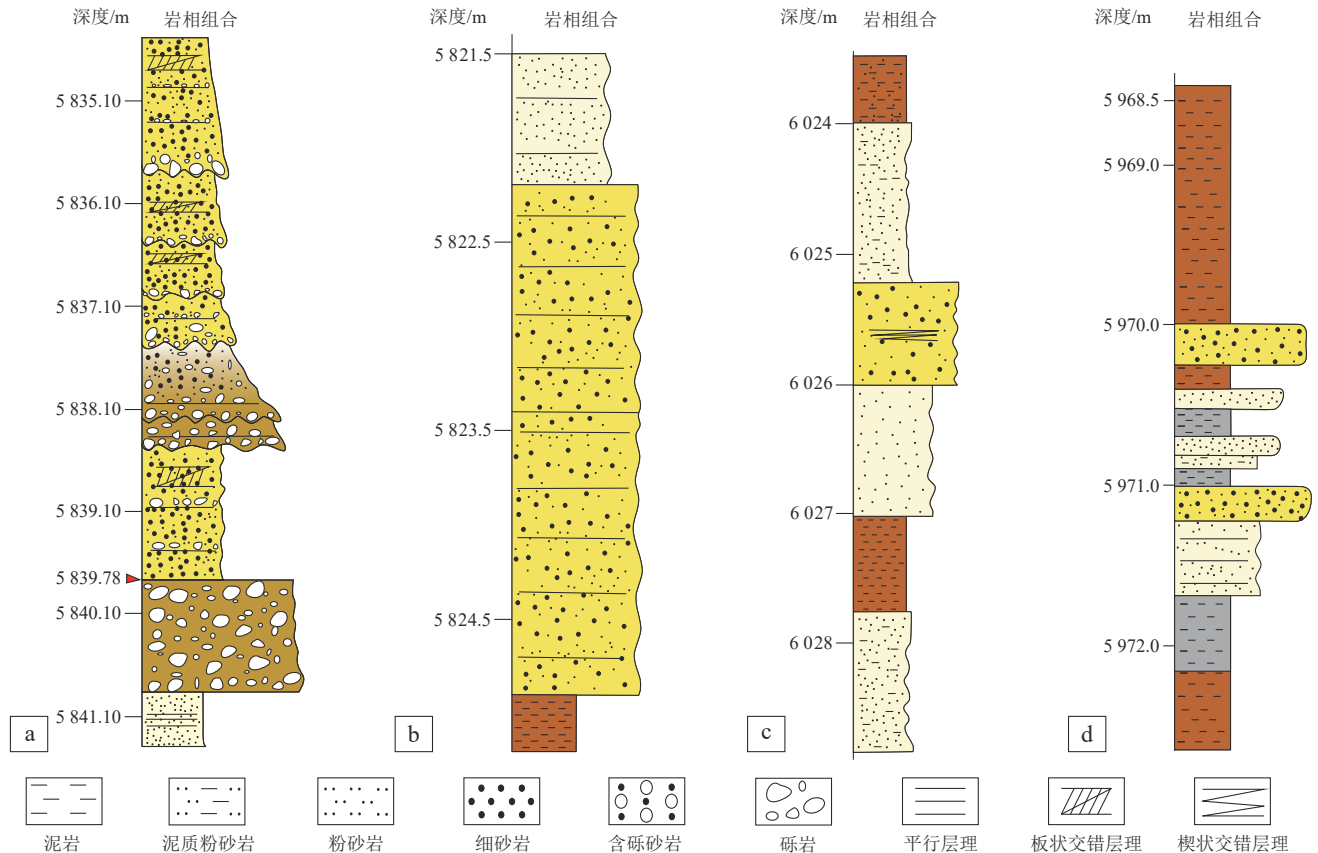


图5 准噶尔盆地永进地区齐古组岩相组合类型

Fig. 5 Lithofacies assemblage types in the J_3q , Yongjin area, Junggar Basin

a. 永进1-1井,埋深5 834.5 ~ 5 841.3 m; b. 永进1-1井,埋深5 821.5 ~ 5 825.1 m; c. 永6井,埋深6 023.6 ~ 6 028.8 m; d. 永进1-3井,埋深5 968.5 ~ 5 972.6 m

理特征,认为齐古组1砂组—3砂组属于干旱型湖盆边缘浅水辫状河三角洲沉积,4砂组物源供给减弱、气候持续干旱,沉积相转变为曲流河三角洲。其中含油层段1砂组—3砂组的三角洲砂体,与湿润气候背景下的浅水三角洲相比,水下分流河道变化较快,随着河道延伸逐渐分叉、改道而发育多种类型的河道砂,基本不发育河口砂坝,该特征与鄱阳湖、岱海等现代浅水三角洲沉积特征相似^[27-28]。

沉积数值模拟是近年来兴起的一种基于泥沙动力学的沉积学研究技术^[29],可根据给定的沉积条件模拟沉积体的生长与演化过程,据此准确厘定沉积相类型及其分布样式。利用永进地区齐古组沉积期的古环境与沉积特征参数(表3),参考鄱阳湖现代浅水三角洲的部分水文数据,设定沉积过程数值模拟的边界条件,采用荷兰Delft3D数模系统模拟近源浅水三角洲的形成过程。模拟结果显示,齐古组沉积初期来自近源古隆起的两支水道入湖,形成初期河口砂坝,主干河道由于水动力强保持方向不变向前延伸,然而受到湖水顶托作用,主河道中相对细粒的砂质沉积物发生决口、改

道、分叉,逐渐演变成多条分流河道,大致表现出网状河型特征(图8)。由于干旱气候下辫状河三角洲的形成多与阵发性山洪有关,推测齐古组1砂组—3砂组的砂体沉积时间不长,岩心上常见正粒序砂层叠覆冲刷现象,泥质隔夹层少,沉积数值模拟结果亦可见早期河口砂坝被后期水下分流河道冲刷侵蚀,河口坝消失殆尽。此外,受浅水可容空间小及湖浪作用等因素的影响,部分分流河道水动力减弱直至废弃,这类沉积物在暴露水面期间易于遭受氧化与生物改造。

根据齐古组的岩石相标志、测井响应特征、地震反演以及沉积数值模拟结果,将浅水辫状河三角洲前缘进一步划分为4种微相,包括高能水下主干河道、中-高能网状分流河道、低能改造型分流河道和分流间湾,河口坝和远砂坝等微相不发育,不同微相类型的特征差异明显(表2)。

2.2.1 高能水下主干河道

研究区内沿永1-1井—永进1-3井和永进14井—永进12井方向存在向南推进的两支主河道,对应于水

表2 准噶尔盆地永进地区齐古组各类沉积微相特征

Table 2 Characteristics of various sedimentary microfacies in the J₃q in the Yongjin area, Junggar Basin

沉积微相类型	岩性特征	主要岩相类型	水动力	地形位置	沉积构造	分布样式	测井响应
高能水下 主干河道	砂砾岩、 含砾粗砂岩	中-细砾岩相、 中-粗砂岩相、 块状泥岩相	强	断槽、沟槽等 相对低部位	平行层理、 板状交错层理	长条形 定向分布	永进1-1井 GR 深度(m) 岩性剖面 RT 5 800 5 810 5 820 5 830 5 840
中-高能网状 分流河道	中-细砂岩、 粉砂岩	中-细砂岩相、 细砂岩相、 块状泥岩相	较强	古地形相对 较高部位	平行层理、 小型交错层理	交织状 连片分布	永进301井 SP 深度(m) 岩性剖面 RT 5 520 5 530 5 540 5 550 5 560
低能改造型 分流河道	粉-细砂岩、 泥质粉砂岩	细砂岩相、 粉砂岩相、 块状泥岩相	较弱	古地形相对 较高部位	小型交错层理、 波状层理	席状 连片分布	永进12井 SP 深度(m) 岩性剖面 RT 5 740 5 750 5 760 5 770 5 780
分流间湾	泥岩	粉砂岩相、 块状泥岩相、 灰色泥岩相	弱	低部位	块状	局限分布	永进304井 SP 深度(m) 岩性剖面 RT 5 570 5 580 5 590 5 600 5 610

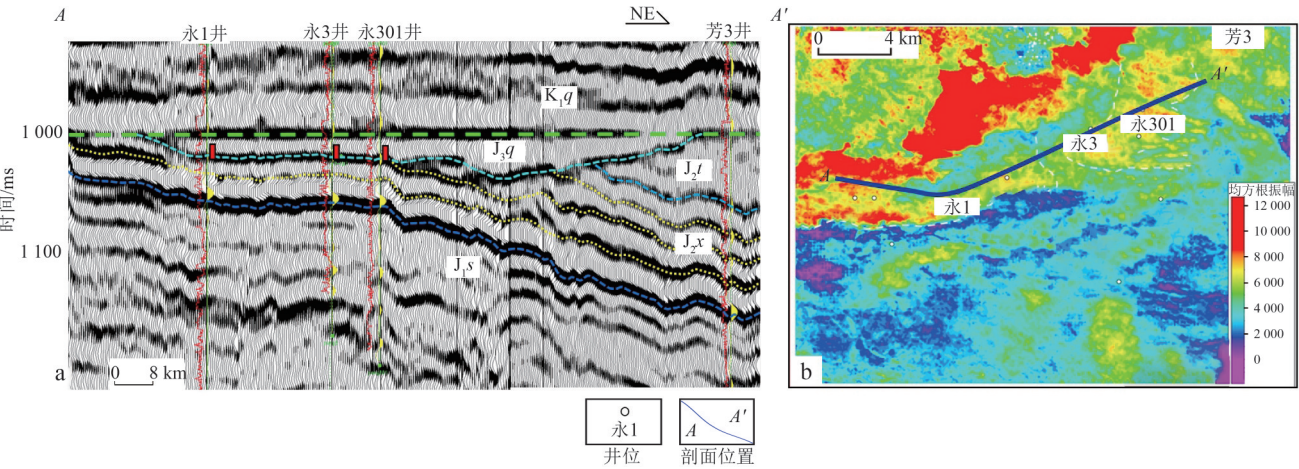


图6 准噶尔盆地永进地区齐古组地震剖面(a)及均方根振幅(b)
Fig. 6 Seismic profile (a) and root mean square (RMS) amplitude map (b) of the J₃q in the Yongjin area, Junggar Basin

动力最强的主流线方向。岩性主要为厚层砂砾岩和含砾粗砂岩,垂向上呈多个正粒序冲刷、切割,泥质夹层少见。砂岩具有平行层理及板状交错层理,向上出现少量低角度交错层理,反映河道能量减弱的沉积过程。常见顺层定向排列的中-细砾岩相、强水动力层理中-

粗砂岩相夹红褐色块状泥岩的岩相组合类型。GR和RT曲线呈厚层块状箱形与齿化箱形,曲线幅值高,异常回返较少,反映河道砂质沉积稳定,泥质夹层少(表2)。沉积数值模拟结果显示水下主河道随着搬运距离变远,河道弯曲度增大,决口、分叉现象增多(图8)。

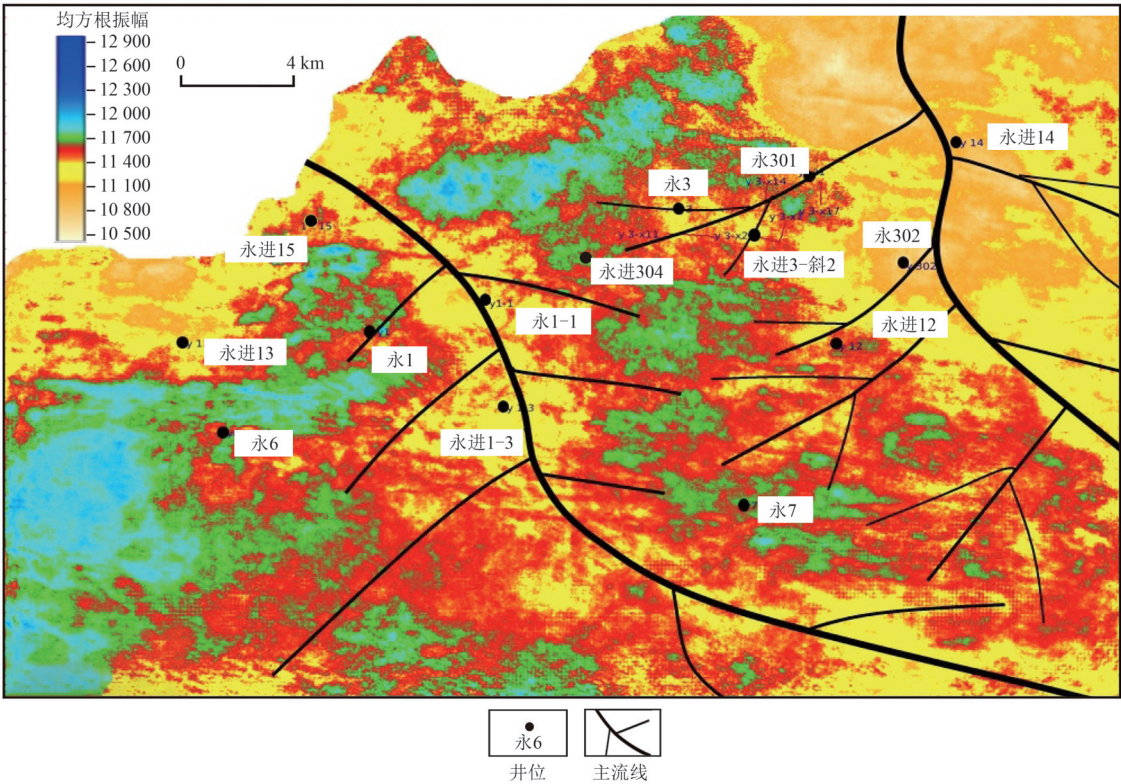


图 7 准噶尔盆地永进地区齐古组储层预测结果
Fig. 7 Reservoir mapping for the J₃q in the Yongjin area, Junggar Basin

表 3 准噶尔盆地永进地区齐古组储层沉积过程数值模拟主要参数

Table 3 Primary parameters for numerical simulations of the sedimentary process of the J₃q reservoirs in the Yongjin area, Junggar Basin

模拟参数	设定值	模拟参数	设定值
沉积物粒度中值	1.0 mm	砂厚变化记录下限	0.2 m
底床坡度	3.0°	水体密度	1 000 kg/m ³
砂/泥比	4:1	河道规模(宽×深)	600 m×2 m
流量	1 500 m ³ /s	重力加速度	9.8 m/s ²
流速	0.8 ~ 1.5 m/s	水平黏滞系数	0.001 m ² /s
网格单元大小	33 m×33 m	模拟时间步长	0.2 min

2.2.2 中-高能网状分流河道

由主干河道向湖盆推进过程中决口、分叉而形成,永进地区齐古组的分流河道与湿润型浅水三角洲相比数量较少(少于 10 条),但其水动力较强、延伸方向较为稳定,表现出网状河型沉积特征。这类分流河道垂向上常表现为底冲刷含泥砾粗砂岩相—平行层理中-细砂岩相—小型交错层理粉砂岩相—红褐色泥岩的岩相组合特征,单层沉积厚度明显薄于主河道,反映干旱气候下间歇性强水流作用。GR 和 RT 曲线呈齿化箱形与钟形,幅值明显低于主干河道。

2.2.3 低能改造型分流河道

该类型分流河道常位于网状分流河道前端,自下而上主要由具冲刷面的细砂岩相—交错层理粉-细砂岩相—波状层理泥质粉砂岩相所组成,层面可见波痕及大量生物扰动现象,如永进 12 井 5 776.5 ~ 5 779.8 m 深度取心段和永 7 井 6 120.4 ~ 6 121 m 深度取心段。由于水动力减弱加之湖浪改造作用增强,该类河道砂体多呈块状特征,夹层少,但由于泥质含量较高,GR 曲线常呈低幅箱形特征。数值模拟显示河道的弯曲度和宽/深比增大,向前进一步发展成为连片分布的席状砂。

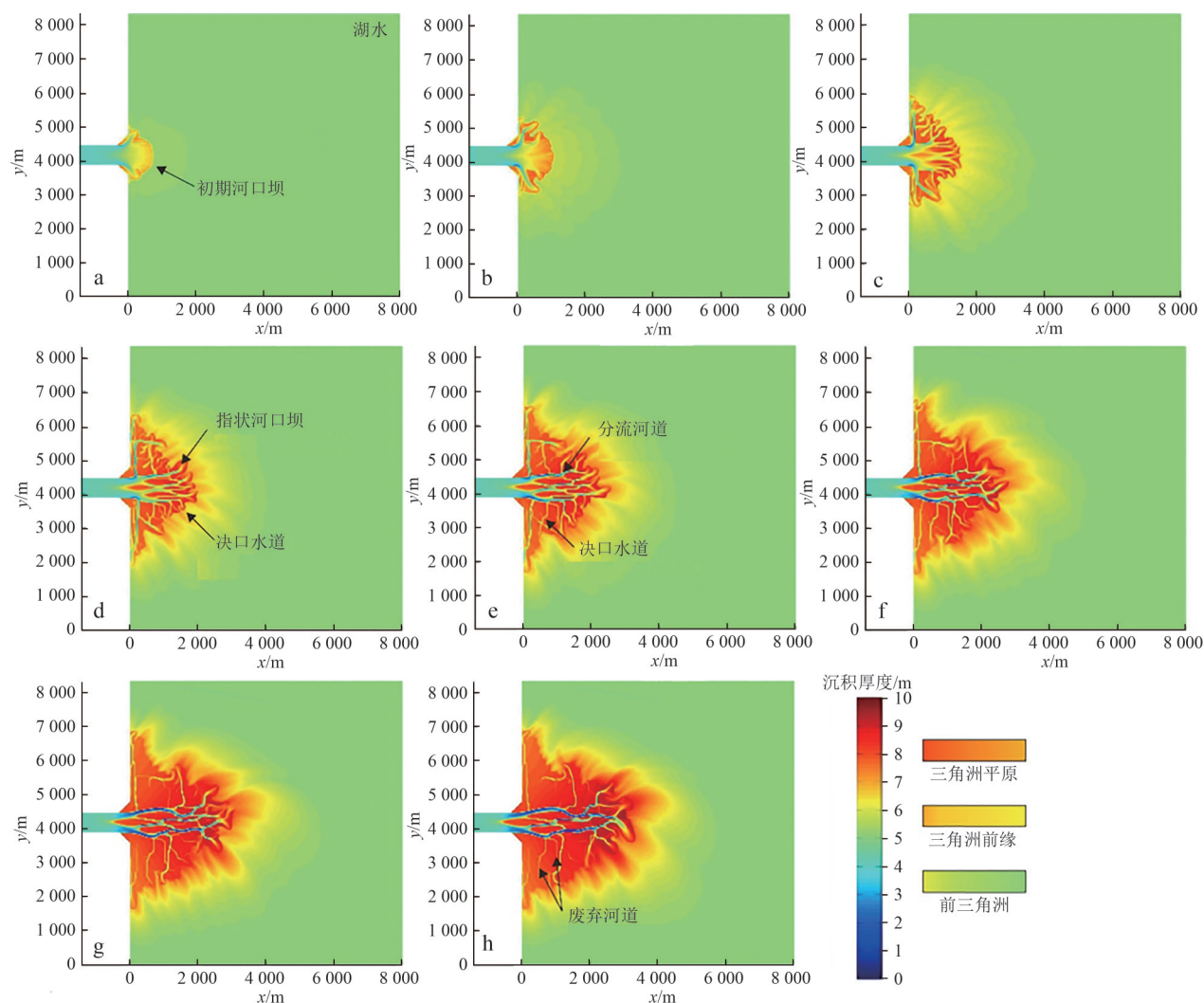


图8 准噶尔盆地永进地区齐古组近源浅水三角洲沉积数值模拟结果

Fig. 8 Sedimentary numerical simulation results of proximal shallow-water deltas in the J_{3q} in the Yongjin area, Junggar Basin

a—h. 分别为第40,100,200,300,400,500,600和700模拟步沉积厚度分布

(x方向距离/m;y方向距离/m。)

2.2.4 分流间湾

浅水三角洲由于河道摆动、切割频繁,砂体往往连片分布,仅在多支主干河道之间可能存在三角洲朵叶间的泥岩沉积。研究区沿永1-1井—永进1-3井和永进14井—永进12井方向的两支主河道之间发育分流间湾,范围较窄,其形状平行于主河道方向。取心显示垂向上主要为灰色夹粉砂质条带泥岩相与红褐色块状泥岩相,GR曲线数值大,SP和RT曲线呈平稳的低值。

3 沉积微相展布特征

齐古组时期,来自北部车-莫古隆起的多支河流入湖,形成三角洲前缘朵叶体(图9)。其中永进303井—

永进1-1井方向的河道规模最大,砂岩厚度和砂岩百分含量均为最高,形成了稳定的水下主干河道砂体。在古气候逐渐干旱、物源供给减弱等影响下,齐古组各砂组的沉积微相分布显示出明显的退积特征。

1砂组沉积时期来自古隆起冲沟的辫状河入湖,形成了规模较大的高能水下主干河道,河道宽度达到5 km,向南决口、分叉形成中-高能网状分流河道与低能改造型分流河道,砂体沉积范围大(图9d)。1砂组是西山窑组与齐古组不整合之上的第一套沉积层,岩性相对较粗,以砂砾岩、含砾粗砂岩为主,分选相对较差,含油性中等。2砂组沉积时期研究区中部的主干河道规模有所减小,东北部冲沟开始供源,区内两支朵叶体在中部交汇,形成了大范围连片分布的网状分流河道与改造型分流河道(图9c)。岩性整体以中-细砂

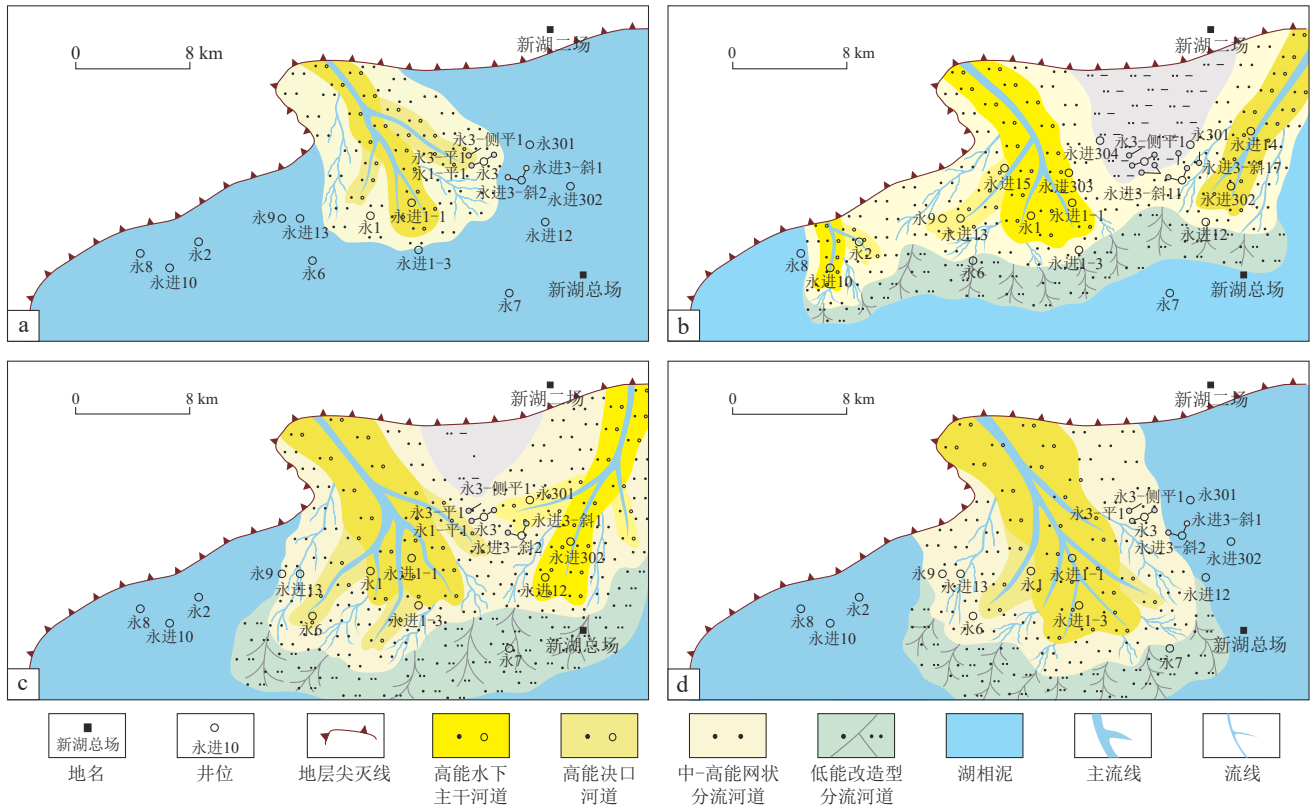


图9 准噶尔盆地永进地区齐古组沉积相平面分布

Fig. 9 Sedimentary facies maps of the J_3q in the Yongjin area, Junggar Basin

a. 4砂组; b. 3砂组; c. 2砂组; d. 1砂组

岩、含砾细砂岩为主,物性较好,是研究区主要的产油层。此外,该时期单井上可识别出部分残余河口坝,但规模很小。3砂组与2砂组沉积特征相似,各微相进一步向北退积,沉积规模逐渐减小(图9b),南部的取心井可见大量生物扰动现象。4砂组沉积时期气候整体十分干旱,车-莫古隆起供源能力减弱,仅北部物源形成了小规模三角洲朵叶体(图9a)。河流能量减弱转变为曲流河道,岩性以红褐色泥岩夹薄层浅灰色、红褐色砂岩为主,含油性较差。

4 沉积模式

与湿润气候背景发育的浅水三角洲相比,干旱条件下的浅水三角洲规模明显较小,且沉积过程具有事件性特征^[30-31],即正常的沉积过程受到干旱事件打断,表现为垂向上砂岩沉积被多期稳定分布的氧化泥岩分割,单期砂体平面分布范围小。气候变化对湖平面升降同样起着重要影响,持续干旱的气候条件导致湖盆可容空间不断减小,河道存在的周期明显偏短,进一步引起单一供给河道控制的沉积体规模有限且顺源分异明显(图10)。三角洲朵叶体中几乎不发育河口砂坝,

往往在形成初期被打断或被后期河道侵蚀。

干旱条件下,浅水三角洲的基本沉积单元是以单一河道(主干河道)供给,并顺源形成供给河道-决口河道-分流河道与朵叶体组合。受到频繁的湖平面升降与高频的沉积间断控制而呈现从物源点出发、呈辐射状切割叠置的朵叶体。以永进地区齐古组2砂组为例,区内主要发育辫状河三角洲前缘亚相,分支河道呈枝状展布,延伸距离相对较远,基本在10 km以上,但平面上河道类型变化较快,相应的岩性组合、粒序结构和夹层数量均有明显差异。从近两年新完钻井的试油情况差异显著^[32],也反映了此类三角洲砂体沉积非均质性明显较强。

5 结论

1) 永进地区齐古组古构造平缓、古气候干旱、沉积水体浅且频繁振荡,车-莫古隆起剥蚀产物向南搬运形成了近源浅水三角洲沉积,其中1砂组—3砂组发育浅水辫状河三角洲沉积,4砂组物源供给减弱、气候持续干旱,沉积相转变为曲流河三角洲。与湿润气候背景下的浅水三角洲相比,水下分流河道变化较快,随

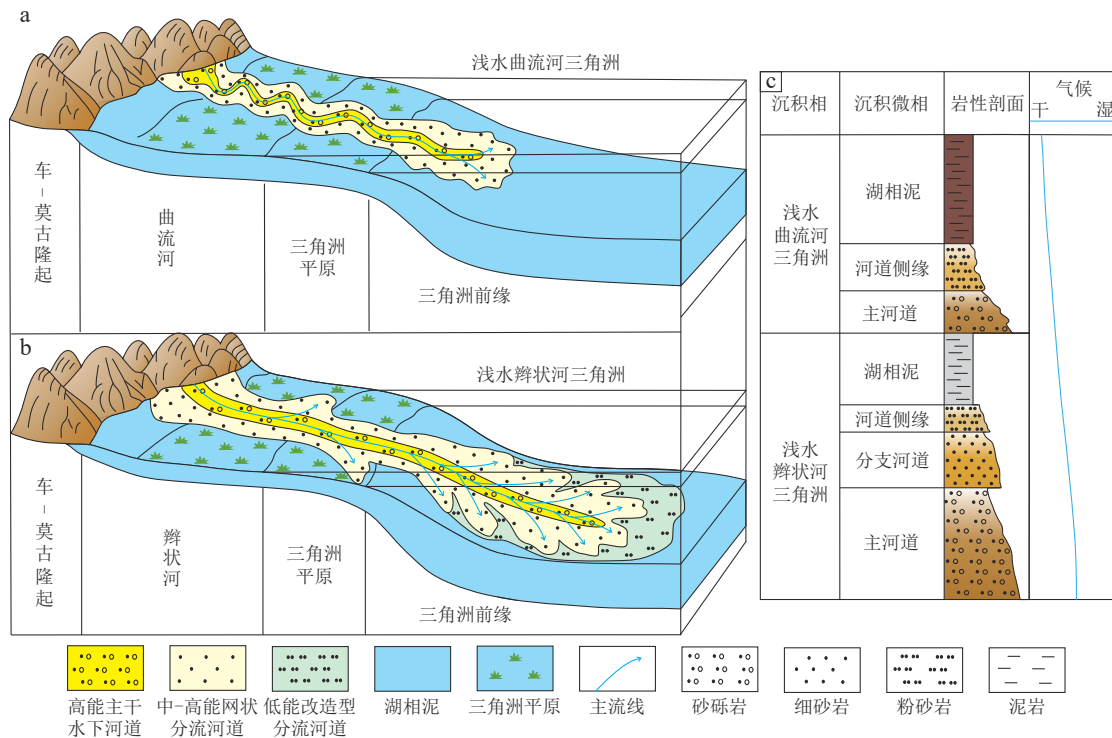


图10 干旱型浅水三角洲沉积相模式

Fig. 10 Sedimentary facies models of arid shallow-water deltas

a. 浅水曲流河三角洲; b. 浅水辫状河三角洲; c. 浅水三角洲沉积序列

着河道延伸逐渐分叉、改道而发育多种类型的河道砂,基本不发育河口砂坝。

2) 根据齐古组的岩石相标志、测井响应特征、地震反演以及沉积数值模拟结果,将研究区浅水辫状河三角洲前缘进一步划分为4种微相,包括高能水下主干河道、中-高能网状分流河道、低能改造型分流河道和分流间湾,各时期沉积微相分布样式整体呈退积特点。

3) 干旱型浅水三角洲的水下分流河道延伸过程中变化快,由于多期分流河道迁移改道,砂体垂向上切割叠置,形成了区内连片的砂体分布样式,但是由于不同时期、不同成因类型的砂体间错叠交织,砂体连通性较差,甚至近距离井间砂体不连通,增加了油气勘探开发的难度。

参 考 文 献

- [1] 朱筱敏,谈明轩,董艳蕾,等. 当今沉积学研究热点讨论——第20届国际沉积学大会评述[J]. 沉积学报, 2019, 37(1): 1-16.
ZHU Xiaomin, TAN Mingxuan, DONG Yanlei, et al. Current hot topics of sedimentology: Comment on the 20th International Sedimentological Congress [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(1): 1-16.
- [2] 张新涛,周心怀,李建平,等. 敞流沉积环境中“浅水三角洲前缘砂体体系”研究[J]. 沉积学报, 2014, 32(2): 260-269.
ZHANG Xintao, ZHOU Xinhui, LI Jianping, et al. Unconfined flow deposits in front sandbodies of shallow water deltaic distributary systems [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(2): 260-269.
- [3] 孙靖,薛晶晶,吴海生,等. 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[J]. 沉积学报, 2016, 34(1): 129-136.
SUN Jing, XUE Jingjing, WU Haisheng, et al. Distal fine-grain shallow-water delta sedimentary characteristics and evolution: A case from Badaowan Formation in the central Junggar Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2016, 34(1): 129-136.
- [4] 杨帆,曹正林,卫延召,等. 玛湖地区三叠系克拉玛依组浅水辫状河三角洲沉积特征[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(1): 30-39.
YANG Fan, CAO Zhenglin, WEI Yanzhao, et al. Sedimentary characteristics of shallow-water braided delta of Karamay Formation in Mahu area [J]. Lithologic Reservoirs, 2019, 31(1): 30-39.
- [5] 易晶晶,陈科霖. 江汉盆地潜江凹陷盐湖浅水三角洲沉积特征与发育模式[J]. 西北地质, 2021, 54(4): 199-210.
YI Jingjing, CHEN Kefei. Sedimentary characteristics and development model of shallow-water delta of salt lake in Qianjiang Depression [J]. Northwestern Geology, 2021, 54(4): 199-210.
- [6] 何庆斌,张继红. 松辽盆地南部大安地区姚一段层序地层格架

- 与浅水三角洲沉积特征及演化[J]. 大庆石油地质与开发, 2022, 41(6): 1-12.
- HE Qingbin, ZHANG Jihong. Sedimentary characteristics and evolution of shallow-water delta in sequence stratigraphic framework of Member 1 of Yaojia Formation in Da'an area, South Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2022, 41(6): 1-12.
- [7] 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.
- [8] 徐振华, 吴胜和, 刘钊, 等. 浅水三角洲前缘指状砂坝构型特征——以渤海湾盆地渤海BZ25油田新近系明化镇组下段为例[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 322-333.
- XU Zhenhua, WU Shenghe, LIU Zhao, et al. Sandbody architecture of the bar finger within shoal water delta front: Insights from the Lower Member of Minghuazhen Formation, Neogene, Bohai BZ25 Oilfield, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 322-333.
- [9] 刘诗奇, 朱筱敏, 王瑞, 等. 陆相湖盆浅水三角洲沉积体系研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 93-104.
- LIU Shiqi, ZHU Xiaomin, WANG Rui, et al. Study on sedimentary system of shallow delta in continental lake basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2012, 31(5): 93-104.
- [10] 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.
- [11] 王文涛. 河控浅水三角洲前缘砂体分布特征及沉积模式研究——以大庆油田杏六区东部S II油层为例[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- WANG Wentao. Research on sandbody distribution and sedimentary model in Shallow lacustrine fluvial-dominated delta front—A case study from SII oil layer in the eastern part of Xing six block of Daqing Oilfield [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [12] 王夏斌, 姜在兴, 胡光义, 等. 浅水三角洲分流河道沉积模式分类[J]. 地球科学与环境学报, 2020, 42(5): 654-667.
- WANG Xiabin, JIANG Zaixing, HU Guangyi, et al. Classification of sedimentary models of distributary channels in shallow-water deltas[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2020, 42(5): 654-667.
- [13] 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化[J]. 地学前缘, 2000, 7(4): 431-440.
- CAI Zhongxian, CHEN Fajing, JIA Zhenyuan. Types and tectonic evolution of Junggar Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 431-440.
- [14] 鲁雪松, 赵孟军, 陈竹新, 等. 准噶尔盆地南缘齐古油田油气成藏再认识及勘探启示[J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1045-1058, 1115.
- LU Xuesong, ZHAO Mengjun, CHEN Zhuxin, et al. Recognition of hydrocarbon accumulation in Qigu oilfield and implications for exploration in the southern margin of Junggar Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(9): 1045-1058, 1115.
- [15] 何文军, 费李莹, 阿布力米提·依明, 等. 准噶尔盆地深层油气成藏条件与勘探潜力分析[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 189-201.
- HE Wenjun, FEI Liying, YIMING Abulimiti, et al. Accumulation conditions of deep hydrocarbon and exploration potential analysis in Junggar Basin, NW China [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 189-201.
- [16] 任新成. 准噶尔盆地永进油田西山窑组油藏成岩演化及成藏史[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(1): 21-28.
- REN Xincheng. Diagenetic evolution and hydrocarbon accumulation history in reservoirs of Xishanyao Formation in Yongjin Oilfield, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(1): 21-28.
- [17] 董臣强. 准噶尔盆地永进油田西山窑组储层形成机理研究[J]. 新疆地质, 2014, 32(1): 92-95.
- DONG Chenqiang. The formation mechanism of reservoir from Xishanyao Formation in Yongjin Oilfield, Tarim Basin [J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(1): 92-95.
- [18] 范媛媛. 新疆准噶尔盆地南缘上侏罗统齐古组沉积相及沉积环境研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- FAN Yuanyuan. A study on sedimentary facies and sedimentary environment of the Upper Jurassic Qigu Formation in the southern margin of Junggar Basin, Xinjiang [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [19] 唐勇, 宋永, 何文军, 等. 准噶尔叠合盆地复式油气成藏规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 132-148.
- TANG Yong, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Characteristics of composite hydrocarbon accumulation in a superimposed basin, Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 132-148.
- [20] 修金磊, 王晓, 刘胜涛, 等. 准噶尔盆地永进地区西山窑组储层特征及影响因素[J]. 石油地质与工程, 2015, 29(3): 28-30.
- XIU Jinlei, WANG Xiao, LIU Shengtao, et al. Reservoir characteristics and influencing factors analysis of Xishanyao Formation in Yongjin area, Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2015, 29(3): 28-30.
- [21] 朱珍君, 李琦, 李剑, 等. 准噶尔盆地莫西庄—永进地区白垩系清水河组地貌演化及沉积响应[J]. 现代地质, 2022, 36

- (1): 105-117.
- ZHU Zhenjun, LI Qi, LI Jian, et al. Geomorphic evolution and sedimentary response of Cretaceous Qingshuihe Formation in Moxizhuang-Yongjin area, Junggar Basin[J]. *Geoscience*, 2022, 36(1): 105-117.
- [22] 郑丹. 准噶尔盆地莫西庄-永进地区油气成藏差异分析[J]. *石油地质与工程*, 2022, 36(3): 33-39.
- ZHENG Dan. Difference analysis of oil and gas accumulation in Moxizhuang-Yongjin area of Junggar Basin[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2022, 36(3): 33-39.
- [23] 丁咸宝, 沈扬, 赵永福, 等. 准噶尔盆地永进地区侏罗系红层成因[J]. *油气地质与采收率*, 2009, 16(4): 12-14.
- DING Xianbao, SHEN Yang, ZHAO Yongfu, et al. Genesis of Jurassic red beds in Yongjin area, Junggar Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009, 16(4): 12-14.
- [24] 纪友亮, 周勇, 况军, 等. 准噶尔盆地车-莫古隆起形成演化及对沉积相的控制作用[J]. *中国科学(地球科学)*, 2010, 40(10): 1342-1355.
- JI Youliang, ZHOU Yong, KUANG Jun, et al. Formation and evolution of the Che-Moo paleouplift in Junggar Basin and its control on sedimentary facies[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2010, 40(10): 1342-1355.
- [25] 史建南, 邹华耀, 李平平, 等. 准噶尔盆地永进地区油气成藏主控因素分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(3): 384-389.
- SHI Jiannan, ZOU Huayao, LI Pingping, et al. Analysis of main controlling factors for hydrocarbon accumulation in Yongjin region of Junggar Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(3): 384-389.
- [26] 关旭同, 吴鉴, 魏凌云, 等. 准噶尔盆地南缘建功煤矿剖面齐古组河流沉积与砂体构型[J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(3): 290-297.
- GUAN Xutong, WU Jian, WEI Lingyun, et al. Meandering river deposit and sand body architecture in Qigu Formation of Jiangong coal mine section in the southern margin of Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(3): 290-297.
- [27] 袁选俊, 周红英, 张志杰, 等. 坳陷湖盆大型浅水三角洲沉积特征与生长模式[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(1): 1-11.
- YUAN Xuanjun, ZHOU Hongying, ZHANG Zhijie, et al. Depositional features and growth pattern of large shallow-water deltas in depression basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2021, 33(1): 1-11.
- [28] 石良, 金振奎, 李桂仔, 等. 内蒙古岱海现代辫状河三角洲沉积特征及沉积模式[J]. *天然气工业*, 2014, 34(9): 33-39.
- SHI Liang, JIN Zhenkui, LI Guizai, et al. Depositional characteristics and models of the modern braided river delta in the Daihai Lake, Inner Mongolia[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(9): 33-39.
- [29] 冯文杰, 吴胜和, 张可, 等. 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[J]. *地质学报*, 2017, 91(9): 2047-2064.
- FENG Wenjie, WU Shenghe, ZHANG Ke, et al. Depositional process and sedimentary model of meandering-river shallow delta: Insights from numerical simulation and modern deposition[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(9): 2047-2064.
- [30] 张佩, 钱其豪, 姜明忠, 等. 干旱湖盆边缘浅水三角洲沉积特征与沉积模式——以青海尕斯库勒油田下油砂山组VI油组为例[J]. *沉积学报*, 2023, 41(3): 839-854.
- ZHANG Pei, QIAN Qihao, JIANG Mingzhong, et al. Depositional characteristics and sedimentary model of a shallow-water delta at the lake margin in an arid climate: A case study based on the VI oil zone of the Lower Youshashan Formation, Gaskule Oilfield, Qinghai[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(3): 839-854.
- [31] 孙雨, 赵丹, 于利民, 等. 浅水湖盆河控三角洲前缘砂体分布特征与沉积模式探讨——以松辽盆地北部永乐地区葡萄花油层为例[J]. *沉积学报*, 2015, 33(3): 439-447.
- SUN Yu, ZHAO Dan, YU Limin, et al. Sandbody distribution and sedimentary model in shallow lacustrine fluvial-dominated delta front: A case study from Putaohua oil layer of Yongle area in Songliao Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 439-447.
- [32] 刘明, 田亚铭, 杨明林, 等. 准噶尔盆地永进地区侏罗系西山窑组顶部沉积相研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 44(6): 590-601.
- LIU Ming, TIAN Yaming, YANG Minglin, et al. Sedimentary facies at the top of Jurassic Xishanyao Formation in Yongjin area, Junggar Basin[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2021, 44(6): 590-601.

(编辑 张亚雄)