

砂质辫状河心滩沉积演化规律与沉积构型特征

——基于沉积数值模拟的认识

雷涛^{1,2},任广磊²,李晓慧²,冯文杰³,孙华超²

[1. 中国地质大学(武汉),湖北武汉 430074;2. 中国石化华北油气分公司勘探开发研究院,河南郑州 450006;3. 长江大学地球科学学院,湖北武汉 430100]

摘要:砂质辫状河心滩砂体规模大、连通性强、物性较好,是一类重要的油气储层。受到复杂多变的水动力条件影响,心滩呈现出类型多样、内部构型特征复杂等特征,制约了油气资源高效开发。为探索砂质辫状河心滩沉积演化规律及其控制的沉积构型特征,采用基于水动力场实时求解的沉积数值模拟方法,开展砂质辫状河心滩沉积演化动态模拟和过程解析,结果表明:①砂质辫状河心滩的演化过程包括5个阶段,表现为菱形坝、舌形坝、单元坝、复合坝及改造复合坝的顺次形成和连续转换,各类心滩平面形态、剖面结构样式及定量规模存在显著差异;②水流与心滩的交互作用是主导砂质辫状河心滩沉积演化的主控机理,即水流聚散特征与分布样式的持续变化导致心滩形成、增生、迁移、形变并遭受频繁、复杂的叠切,而心滩的演化又进一步导致水流聚散特征与分布样式的变化;③心滩内部发育前积、侧积及加积3类增生体,从菱形坝形成到改造复合坝发育,心滩内部增生体类型由前积主导转变为前积与侧积共生并最终变为前积、侧积及加积复杂复合,心滩长度、宽度由快速增加转变为缓慢增加并最终维持稳定,沉积记录中终止于不同演化阶段的辫状河心滩储层平面分布样式、内部构型特征及定量规模存在较大差异。

关键词:定量规模;沉积数值模拟;沉积演化;沉积构型;心滩;砂质辫状河

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sedimentary evolution pattern and architectural characteristics of mid-channel bars in sandy braided rivers: Understanding based on sedimentary numerical simulation

LEI Tao^{1,2}, REN Guanglei², LI Xiaohui², FENG Wenjie³, SUN Huachao²

[1. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Exploration and Development Research Institute, North China Petroleum Bureau, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006, China; 3. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China]

Abstract: Mid-channel bars in sandy braided rivers, boasting a large scale, high connectivity, and favorable physical properties, serve as a significant type of hydrocarbon reservoirs. Complex and variable hydrodynamic conditions endow mid-channel bars with multiple types and complex internal architectures, which constrain efficient oil and gas exploitation. This study aims to explore the sedimentary evolution pattern and architectural characteristics of mid-channel bars in sandy braided rivers, with a specific focus on the influence of the sedimentary process. To this end, we conduct the dynamic simulation and process analysis of the sedimentary evolution of sandy braided rivers using a sedimentary numerical simulation method based on the real-time solution in hydrodynamic fields. The results are as follows: (1) Mid-channel bars in sandy braided rivers evolve in five stages, namely the sequential formation and continuous conversion of lozenge-shaped bars, tongue-shaped bars, unit bars, composite bars, and reworked composite bars. These bars differ significantly in planar morphology, cross-sectional structure, and scale; (2) Interactions between water currents and mid-channel bars act as the predominant mechanism governing the sedimentary evolution of sandy braided rivers. Specifically, the constant changes in the convergence and divergence characteristics and

收稿日期:2023-05-08;修回日期:2023-10-20。

第一作者简介:雷涛(1983—),男,博士、高级工程师,沉积学、储层地质学。E-mail: leitao.hbsj@sinopec.com。

通信作者简介:冯文杰(1988—),男,博士、副教授,沉积学、油气田开发地质学。E-mail: fwj1017@yangtzeu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41802123);国家自然科学基金重点项目(42130813);中国石化科技项目(P20065)。

distribution styles of water currents facilitate the formation, accretion, migration, and deformation of the mid-channel bars, which are under frequent and complex superimposition and cutting. In turn, the evolutionary dynamics of the mid-channel bars further induces the above-mentioned changes in water currents; (3) Three types of accretion stemming from progradation, lateral accretion, and aggradation occur within the mid-channel bars. In the process from the formation of lozenge-shaped bars to the emergence of reworked composite bars, the accretion within mid-channel bars evolves from an initial dominance of progradation to the coexistence of progradation and lateral accretion, culminating in a combination of all three accretion types. During the transitional phase, the length and width of the mid-channel bars experience a rapid increase, followed by a slow increase, and finally stabilize. As revealed by sedimentary records, reservoirs of the mid-channel bar microfacies terminating at different evolutionary stages differ significantly in planar distribution pattern, internal architectural characteristics, and scale.

Key words: quantitative aspect, sedimentary numerical simulation, sedimentary evolution, sedimentary architecture, mid-channel bar, sandy braided river

引用格式:雷涛,任广磊,李晓慧,等.砂质辫状河心滩沉积演化规律与沉积构型特征——基于沉积数值模拟的认识[J].石油与天然气地质,2023,44(6):1595–1608. DOI:10.11743/ogg20230620.

LEI Tao, REN Guanglei, LI Xiaohui, et al. Sedimentary evolution pattern and architectural characteristics of mid-channel bars in sandy braided rivers: Understanding based on sedimentary numerical simulation[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1595–1608. DOI: 10.11743/ogg20230620.

辫状河是一种常见河流类型,根据沉积物粒度粗细差异,可将其分为砾质辫状河和砂质辫状河两类^[1]。砂质辫状河广泛见于太古代至今的所有地层记录中,主要发育于坡度较缓的冲积平原上,可形成大规模、宽带状、泛连通的优质储集体^[2]。在中国鄂尔多斯、准噶尔、塔里木、松辽和渤海湾等大型含油气盆地内均发现了大规模砂质辫状河成因的油气储层^[3–12]。作为砂质辫状河主要沉积单元,心滩具有规模大、连通性强、物性较好等优势特征,往往是砂质辫状河成因油气藏的主要开发目标^[13–14]。由于砂质辫状河形成过程中辫状河道频繁迁移,心滩的沉积过程及其内部构型十分复杂,对于心滩内部构型认识的不足制约了油气资源的高效开发,因而心滩沉积特征与内部构型一直是国内外学者关注和研究的热点^[14]。

目前针对砂质辫状河心滩沉积构型的研究主要依赖于野外露头沉积学分析、现代沉积观察及地下储层密井网解剖,而对于砂质辫状河心滩的成因与构型模式研究主要依赖前两者。地质学家根据现代砂质辫状河地貌形态的差异提出了两种较为经典的沉积构型模式,即“南萨斯喀彻温型”和“普拉特型”^[15–16]。国内多位学者对大同盆地侏罗系云冈组、黄河禹门口–永济段、山西宝德扒楼沟二叠系山西组、阜康、柳林及延安地区的古代、现代砂质辫状河进行沉积构型解剖,发现了典型的心滩–水道充填组合及心滩内部淤层,并建立了较为完善的沉积构型模式^[17–22]。

前人通过现代沉积、露头解剖及水槽模拟实验研究建立了砂质辫状河及其内部心滩的理想沉积模式

并探讨了沉积物成分、水动力、植被发育情况对辫状河沉积特征的影响机制,但对于各种类型的心滩在形态学和内部构型上的差异及其成因缺乏研究^[23–30]。这也限制了地下砂质辫状河储层构型解剖的进一步深入。长期以来,地下砂质辫状河沉积构型解剖主要依赖于理想的“心滩–河道”组合式的模式指导^[31–34],解剖出的心滩大部分以浑圆的椭圆状为主,心滩内部夹层也主要为上凸状薄层,难以达到对不同类型的心滩的构型样式及其内部夹层进行有区别的精细解剖。这主要受限于两方面的因素:①露头、现代沉积及地下地层钻探资料数量有限、多解性强、分辨率有限、完整度低,目前三维地震资料分辨率十分有限,多数情况下仅能识别河道,分辨心滩已十分困难,更不要说识别心滩内部构型特征了^[3];②基于静态的露头及十分有限的现代沉积演化观察资料无法明确砂质辫状河动态演化过程,因而难以深入理解各种类型心滩的内部构型特征及其差异性。在砂质辫状河心滩沉积构型研究方面,尚存在如下科学问题有待深入探索,包括:①各类心滩沉积构型模式及其差异性尚不明确;②砂质辫状河内部各类心滩的沉积动力学成因机制仍不明确。

近年来,基于Delft3D软件进行三维水动力场沉积数值模拟的技术逐步发展成熟并成功应用于三角洲、河流沉积学研究^[35–40],为沉积学家从沉积动力学的角度研究沉积过程与沉积构型提供了一种有力的手段。本文通过基于三维水动力场的沉积数值模拟,深入探索砂质辫状河各类心滩沉积演化规律,明确其成因动

力条件,阐明其沉积构型特征,对于指导油气精细勘探开发有着重要的实际意义,同时,对于深化河流沉积学和储层地质学研究具有较大的理论意义。

1 研究方法与沉积模拟

本文采用基于三维水动力场连续解算的沉积数值模拟软件 Delft3D 开展砂质辫状河沉积过程模拟,获得沉积地貌演化序列数据,在此基础上通过地貌演化解析明确砂质辫状河形成与演化过程中心滩平面形态与内部构型特征。

1.1 沉积数值模拟方法原理

Delft3D 软件是由荷兰代尔夫特大学 Deltares 中心开发的三维水动力数值模拟软件,主要包含 Flow, Wave 和 Part 等模块。本研究采用适用于河流沉积过程模拟的 Flow 模块开展模拟。模拟过程遵循流体动量守恒与物质守恒定律,主要包括4个计算步骤:①通过求解纳维-斯托克斯方程(Navier-Stokes equations, N-S equations),获得模拟网格内水体流动状态;②计算沉积物搬运量、沉积量及侵蚀量;③根据①和②的计算结果计算沉积地貌、沉积物等参数;④保存计算结果并更新模拟数据。Flow 模块通过第①—④步的循环计算实现沉积过程的连续动态模拟^[37-38]。为了准确模拟砂质沉积物在辫状河水体驱动下的搬运、沉积、侵蚀作用,选择 Engelund-Hansen 公式用于沉积物搬运计算^[41-42]。

1.2 模拟边界条件设定与模拟验证

为确保模拟结果与自然界砂质辫状河沉积记录的相似性,模拟实验以鄂尔多斯盆地北部下石盒子组砂质辫状河为实例参考,获取其古水动力参数并据此设定模拟参数。鄂尔多斯盆地北部下石盒子组发育典型的砂质辫状河,在陕西榆林市府谷县有出露条件良好的野外露头剖面群,同时也是大牛地气田的主力产层,有大量的钻井及取心分析资料,可支撑古水动力分析。基于下石盒子组辫状河沉积动力条件进行数值模拟,对于指导辫状河储层油气精细勘探开发有着重要的实际意义,同时,对于深化河流沉积学和储层地质学研究具有较大的理论意义。

根据鄂尔多斯盆地大牛地气田储层岩心分析和府谷天生桥露头样品分析,综合可得,下石盒子组砂质辫状河宽1~6 km,心滩单期增生砂体厚度1~8 m,主要岩性为中砂岩,沉积物中值粒径为300 μm ,主要矿物成分为石英,沉积时期古地貌坡度为0.005°~

0.060°^[9,43]。根据单期增生砂体厚度及相关经验公式计算^[43],认为下石盒子组沉积时期平均古水深为4~6 m,流速范围为0~4.5 m/s。

根据上述古水动力资料,首先设定了一个长80 km、宽3.2 km的模拟网格,按照50 m×20 m的精度剖分为1 600×160个网格单元,这一网格单元对应了下石盒子组辫状河的平均规模,并具有足够长的模拟河段;在此基础上确定了初始沉积底床,顺源坡降为7.4 m/80 km(图1);然后以当前模拟网格为基础,在上游入水口给定多个流量进行试算,并最终确认流量为40 000 m³/s时,模拟辫状河平均水深与流速与下石盒子组沉积时期古水流特征最为接近;最后,根据沉积物粒度数据,设定了细砂、中砂、粗砂及巨砂4种组分,并按照25%,50%,15%及10%的比例供应上述砂质沉积物,以保证供应的砂质沉积物中值粒径约为300 μm 。此外,按照一般河流中泥质与砂质沉积物比例(2:1~10:1)设定砂质沉积物供给浓度为2 kg/m³,泥质沉积物供给浓度为10 kg/m³。最后,在参考同类模拟实验^[37,44]的基础上,确定了各项模拟参数(表1)。

1.3 沉积演化过程与构型分析方法

在 Delft3D 模拟过程中,可按照一定的时间步长保存模拟产生的数据,包括:水深、流速、流向、沉积物搬运负载(包括底床搬运和悬浮搬运)、沉积地貌、沉积物成分比例等数据,可用于沉积演变过程分析和沉积构型解析。本文以沉积模拟产生的时间序列化河床地貌数据为基础,利用自主设计和编写的沉积过程解析沉积构型分析软件(Quantitative Sedimentary Architecture Analysis Software, QSAAS),开展沉积演化过程分析与沉积构型解剖。该软件可载入 Delft3D 模拟产生的网格化数据,按照给定的时间间隔抽取序列化的沉积地貌数据,计算整个模拟过程中的沉积、侵蚀、充填过程及沉积体的最终保存状态,按照模拟时间顺序重构数字化的二维构型剖面和三维沉积体。

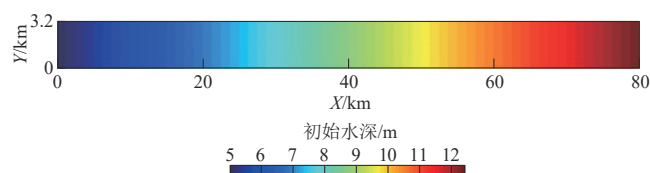


图1 砂质辫状河模拟网格与初始水深分布

Fig. 1 Simulation grid and initial water depth distribution of a sandy braided river

(X为模拟区横坐标,Y为模拟区纵坐标。)

表1 砂质辫状河沉积数值模拟参数

Table 1 Parameters for the sedimentary numerical simulation of a sandy braided river

参数项	模拟设定值				说明
沉积物粒度中值/um	300				—
泥质沉积物供应量/(kg/m³)	10				参考现代沉积数据
砂质沉积物浓度/(kg/m³)	2.5				
沉积物组分	细砂	中砂	粗砂	巨砂	
砂质沉积物组分粒度中值/μm	150	300	750	1 500	多种组分混合后中值粒径约为 300 μm
砂质沉积物组分含量(质量占比)/%	25	50	15	10	
沉积物浓度/(kg/m³)	1.25	2.50	0.75	0.50	
砂质沉积物密度/(g/cm³)	2.65				冲积平原坡度平缓
底床坡度/(°)	0.005 ~ 0.060				
河道宽度/km	3.2				
水流量/(m³/s)	40 000				
平均水深/m	4 ~ 6 m				取决于河宽、底床坡度及水流量
控制流速/(m/s)	0 ~ 4.5				
网格单元大小/m	50×20				地貌模拟加速 48 倍 (参考 Schuurman 等, 2013)
平面网格单元总量/个	1 600×160				
模拟区域尺寸/m	80 000×3 200				
地貌演化系数	48				
底床糙度—chezy 值/(m ^{1/2} /s)	45				
水平涡粘系数/(m²/s)	1 000				
垂向涡粘系数/(m²/s)	0.001				
临近干网格侵蚀系数	0.25				
水动力计算时间步长/min	0.2				
沉积模拟数据保存时间步长/min	15				

2 心滩形成与演化过程

2.1 河床地貌演化过程

在沉积数值模拟中,初始底床均为平缓的砂质层,代表辫状河形成之前的平缓地形,经过1 900余个模拟步长的模拟,辫状河沉积地貌经历了5个阶段的演变(图2)。

① 底床砂在水流的推动作用下开始逐步演化,形成小规模、接近菱形的沙丘/沙坝(图2a)。

② 经过一段时间的连续演变,菱形沙坝逐步迁移、合并、改造,形成类似舌尖的“舌状”沙坝,其迎水面两侧可见较深的辫状水道锥形,此时河道尚不连续,实际上为局部的冲刷沟(图2b)。

③ 辫状河进一步演化导致舌状沙坝逐步向下游迁移、合并,形成现代辫状河中普遍存在的心滩,这类心滩具有较短的迎水边界和较长的背水边界,整体呈上下游不对称的近椭圆状,此时辫状河道也逐步成形,

但其长度仍较为有限(图2c)。

④ 在持续的水流与沉积物供应下,单元坝进一步迁移、演变、复合(拼接),形成复合沙坝,这种沙坝整体形态与单元坝类似,但其规模更大、地貌特征也更复杂(图2d)。

⑤ 复合沙坝边部和顶部受到漫溢水流侵蚀改造,形成较复杂的窜沟体系(图2e)。

在数值模拟中,辫状河沉积地貌的改变是连续的、阶段性的,这一演变过程是导致心滩与辫状河道沉积特征与内部构型复杂的主导因素。

2.2 心滩类型与演变规律

根据辫状河演化过程中沙坝与辫状河道网络的形态特征,可识别出5类心滩,包括菱形坝、舌形坝、单元坝、复合坝和复合改造坝(图3)。

本模拟中,在平坦的砂质底床上,辫状河的演化过程可分为心滩雏形形成、菱形坝形成、舌形坝形成、单元坝形成、复合坝形成和复合改造坝形成(图3)。经历过上述6个阶段的演化后,在不改变砂质辫状河外

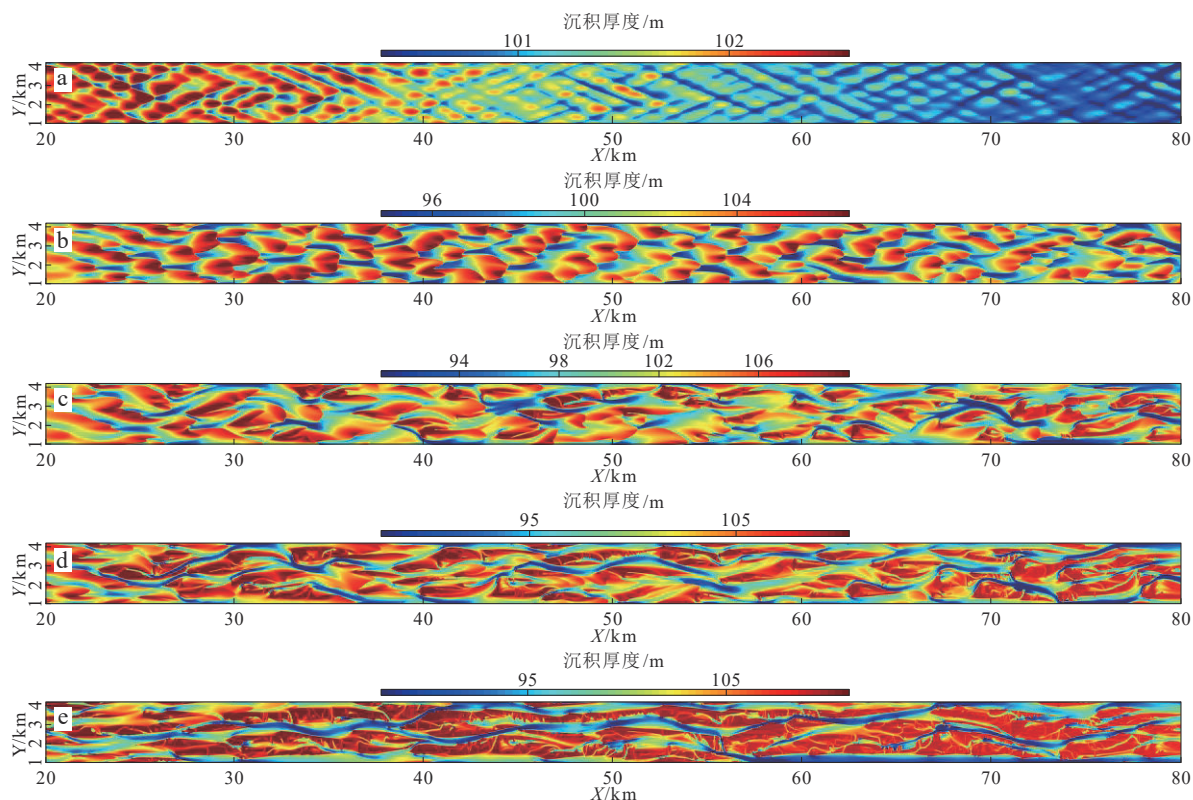


图2 沉积数值模拟中砂质辫状河沉积地貌特征

Fig. 2 Depositional geomorphology characteristics of a sandy braided river in numerical simulation

a—e. 分别为第450,650,750,850和1150模拟步沉积厚度分布

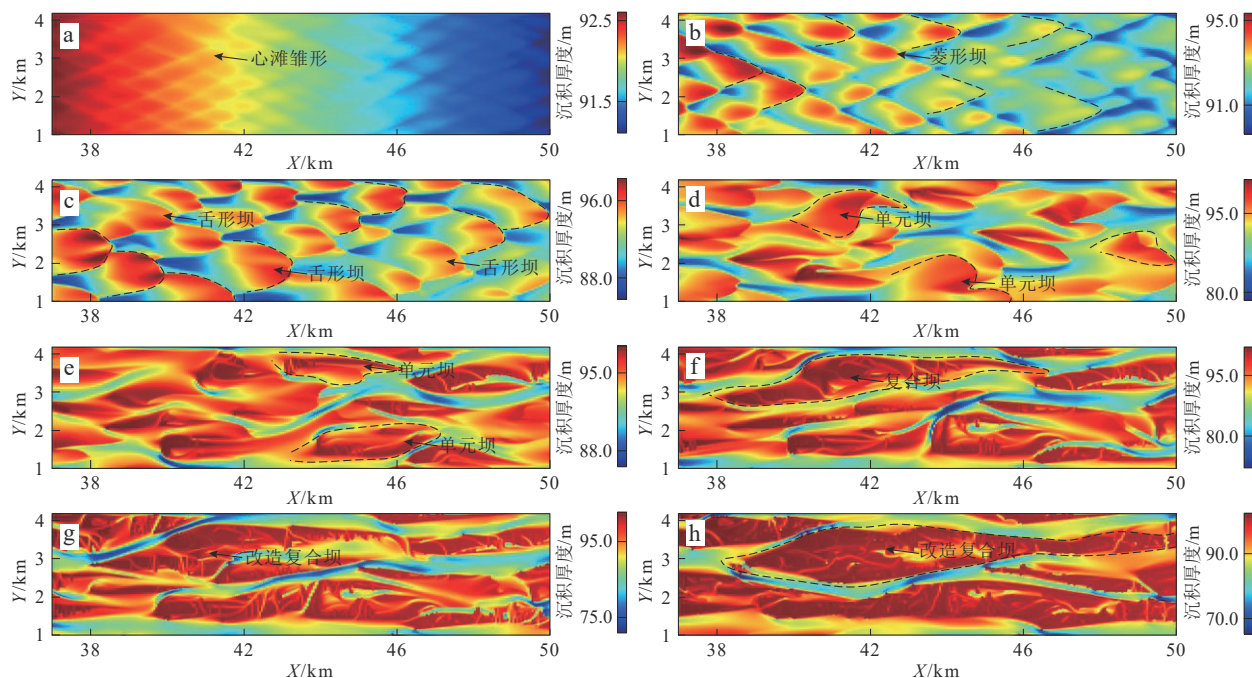
(黄色-红色区域属于地貌较高部位,为心滩;蓝色-浅绿色区域为地貌较低部位,为辫状河道; X 为模拟区横坐标, Y 为模拟区纵坐标。)

图3 不同模拟阶段心滩形态与沉积厚度分布特征

Fig. 3 Morphology and sedimentary thickness distributions of mid-channel bars at different stages in simulation

a—h. 分别为第350,450,650,750,800,850,1000和1150模拟步沉积厚度分布

(黄色-红色区域属于地貌较高部位,为心滩;蓝色-浅绿色区域为地貌较低部位,为辫状河道; X 为模拟区横坐标, Y 为模拟区纵坐标。)

部沉积条件的情况下,辫状河沉积特征渐趋稳定(图2,图3)。

在演化早期,心滩的形态变化较快、向下游迁移速率也较快(图3a—c);而随着单元坝型心滩的形成并逐步迁移合并成复合坝,心滩的演化速率逐步减慢,整体趋于保持稳定(图3d—f);复合坝形成后,一方面其边缘部位仍存在较缓慢的变化(图3h),而另一方面其顶部往往被浅水改造而形成众多冲沟(图3g—h)。

2.3 辫状河沉积演变过程动力学机制

2.3.1 辫状河沉积动力特征演变

在沉积数值模拟和水槽模拟中,尽管边界条件(水流量、沉积物供应、水位)保持恒定,辫状河的水动力条件也存在明显的变化:随着辫状河心滩、辫状河道的逐步演变,其内部水动力条件也随之变化,而水动力条件的变化进一步促进沉积地貌的变化,最终沉积地貌与水动力条件进入稳定状态,并保持到辫状河生命周期结束。在整个模拟过程中,辫状河道发育程度、流速等关键参数存在显著的阶段性变化特征(图4,图5)。

采用辫状河道发育面积代表辫状河道发育程度,其获取方式为:计算水流速度 >1 m/s且水深 >0.5 m的所有网格单元面积。由于整个模拟区的面积是一定的,故获得辫状河道分布区域的面积即可同时获得辫状河心滩面积。根据计算结果,在模拟的初期(1~610步)辫状河道覆盖整个模拟区,此时尚无出露水面

的心滩。随后河道面积占模拟区域面积的比例开始逐步减小至整体区域的50%左右,显示在沉积模拟过程中,心滩的面积逐步增大,而辫状河道的面积占比则逐步缩小。在数值模拟的最后阶段,河道面积减小速度已经很低,辫状河道体系整体趋于稳定(图4,图5)。

平均流速指示了辫状河的平均水动力强度,虽然辫状河的上游供水总是保持稳定,但河床内部水流速度却存在变化:在心滩发育成形并出露水面之前,河床内沙质沉积物的逐渐堆积和心滩雏形的形成使得河床部分区域变浅,造成局部水流加速,因而整体水流速度缓慢升高;随着单元坝的形成和出露水面,造成水体流动空间进一步缩减,导致水流开始集中于辫状河道内,平均水流速度快速上升,而水流的集中和加速又进一步提高了心滩的形成与演化速度。在这一过程中,单元坝快速迁移合并形成复合坝并进一步受到改造。直到辫状河沉积演化成熟稳定后,辫状河道体系与心滩的分布样式稳定,水流速度平均值进入稳定的轻微震荡状态,并一直持续到模拟结束(图4,图5)。

在整个模拟过程中,水流速度平均值代表的水动力强度经历了缓慢升高、快速升高、维持稳定3个阶段,相应地,水流速度标准差也呈现出了3个类似的演变过程,显示随着水流速度平均值的提升,水流速度的差异也在逐步增大,即在整体模拟区域内由均匀近等速变为不规律、高低速差异明显的状态。在模拟中期,单元坝逐步复合,辫状水道逐步发育成熟,并在复杂的心滩分布格局的影响下形成了一定水流速度分异,导致流速标准差快速升高。到模拟后期,即复合心滩形成后的演化过程中,心滩顶部出现的一系列窄沟,其流速较缓,这导致流速标准差的进一步升高(图4)。

2.3.2 心滩连续演变动力机制

根据流速与地貌叠合图分析可知,各类心滩的连续性演化受到水流样式及其变化的主导。在平坦底床上,水流受河岸阻滞产生二次流并向对岸传导形成水波干涉,导致心滩雏形形成并逐步生长为菱形坝(图5a,b)。菱形坝约束水流并导致沉积物与水流先汇聚后发散,从而形成舌形坝(图5c)。舌形坝生长至相互接触后使得水流变得不规律且逐步聚集形成辫状水道并进一步导致单元坝形成(图5d,e)。单元坝在不同辫状水道内不同强度的水流驱动下发生差异化顺流迁移,不同单元坝的迁移速率差异导致独立的单元坝在河床相互“追赶”并最终发生“碰撞”,从而形成复

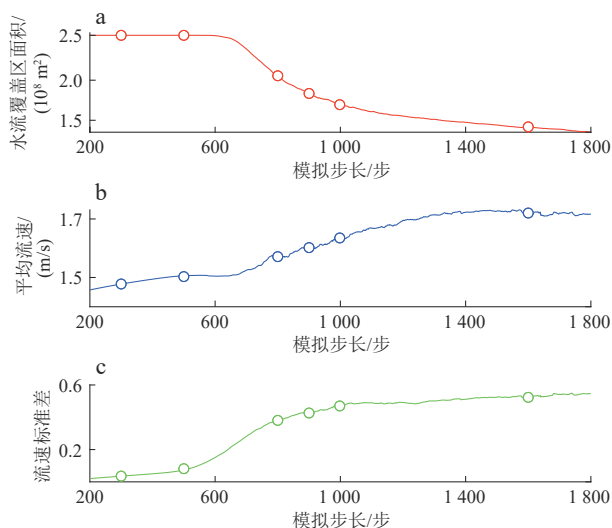


图4 砂质辫状河沉积演化过程中水动力条件变化过程

Fig. 4 Changes in hydrodynamic conditions during the sedimentary evolution of a sandy braided river
a. 辫状河道面积; b. 平均流速; c. 流速标准差

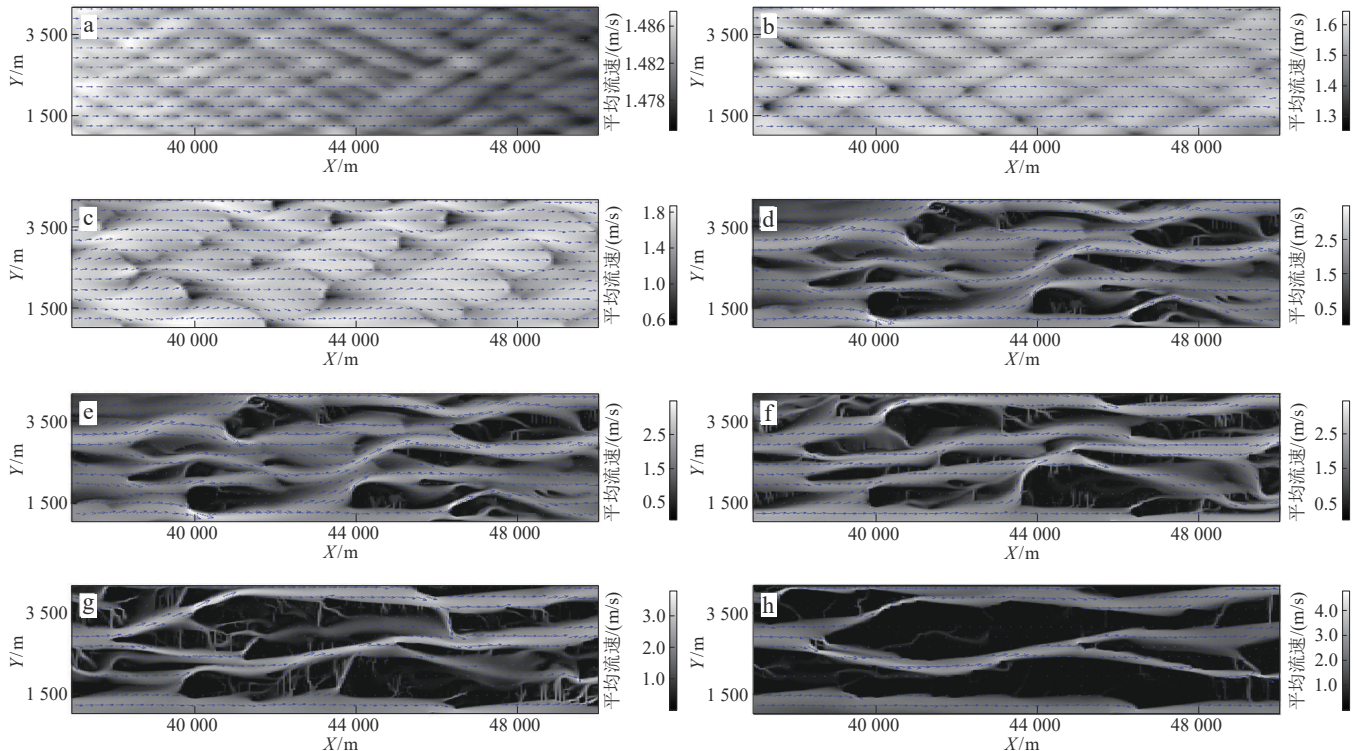


图5 砂质辫状河沉积演化过程中水体流速与流向分布(蓝色箭头示意流向)

Fig. 5 Water flow velocities and directions during the sedimentary evolution of a sandy braided river (blue arrows represent water flow directions)

a—h. 分别为第400,500,600,700,800,900,1 000和1 600模拟步
(X 为模拟区横坐标, Y 为模拟区纵坐标。)

合坝(图5f)。复合坝形成后辫状水道逐步趋于稳定,部分水流漫过复合坝顶部并改造其地貌,形成顶部发育诸多冲沟的改造复合坝(图5g,h)。

3 心滩定量规模

在模拟过程中,随着心滩形态与类型的逐步演变,其规模也存在显著的差异性。以50个模拟步长为间隔,测量了模拟过程中不同阶段辫状河心滩的长、宽及长宽比。根据每一模拟步长结束后的测量结果,计算心滩长度、宽度及长宽比平均值,结果表明:

①从菱形坝的发育到复合坝的形成,辫状河心滩的长度和宽度逐步增大,进入改造复合坝发育阶段后心滩长度和宽度逐步趋于稳定(图6)。

②心滩规模的增加与其类型演变存在直接关联。在菱形坝、舌形坝及单元坝发育阶段,心滩规模的变化取决于这两类心滩的增生。进入复合坝发育阶段后,心滩规模的变化主要由单元坝的顺源拼合导致,并主要体现在心滩长度增加上。进入改造复合坝发育阶段,心滩的形态与规模基本稳定,少数窄沟逐步深切并

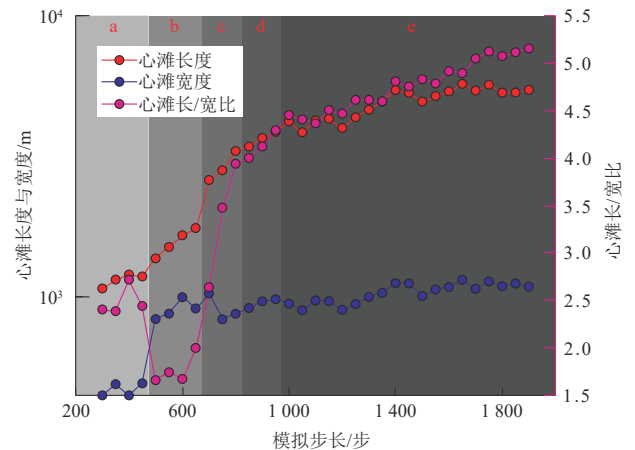


图6 模拟辫状河演化过程中心滩规模变化曲线

Fig. 6 Curves showing scale variation of the mid-channel bars in the simulated evolutionary process of a braided river

a. 菱形坝发育阶段; b. 舌形坝发育阶段; c. 单元坝发育阶段; d. 复合坝发育阶段; e. 复合改造坝发育阶段

发育成辫状河道,可能导致部分心滩被分割,引起心滩平均规模的小幅度波动(图6)。

③心滩长/宽比变化规律存在“三段式”特征,在菱形坝发育阶段长/宽比约为2.50,而在舌形坝发育阶段

长/宽比仅为1.75,在单元坝-复合坝发育阶段长/宽比由2.00快速增加到4.00,并在改造复合坝发育阶段缓慢增加到5.00后保持稳定(图6)。

4 心滩沉积构型特征及其演变

根据沉积过程模拟结果,砂质辫状河心滩的主要类型包括菱形坝、舌形坝、单元坝、复合坝及改造复合坝共5种类型。前4种属于砂质辫状河演化过程中的中间产物,而改造复合坝则是砂质辫状河演化成熟后的最终产物。

在自然界,由于辫状河水动力条件往往频繁变化,造成上述5类心滩实际上是反复形成、偶尔保存、多数被侵蚀,构型特征十分复杂。

4.1 菱形坝构型特征

菱形坝形成于砂质辫状河演化早期阶段,其平面形态多为较为理想的菱形,坝边部顺直。剖面结构较为简单,顺流方向一般呈连续前积状沉积在较为平坦或略有起伏的底形上(图7a,b);横切水流方向上则呈现底平顶凸、内部逐层加积式沉积,底形与菱形坝之间

存在较明显界面,坝内部也可见侧向迁移变化造成的大型底形(图7c,d)。

4.2 舌形坝构型特征

舌形坝是一种常见的心滩类型,在现代辫状河中时有发现。其平面形态往往呈现典型的舌头形态:上游舌根部水深较大,中游舌中部位水深较小、沉积物较宽厚,下游舌尖部位向外凸出、形态圆滑(图8)。

舌形坝剖面构型特征较菱形坝更复杂,顺源剖面上具有明显的先侵蚀底床、随后沉积形成高角度前积体的特征(图8a,b);而在横切水流方向的剖面上,舌形坝呈现明显的由坝核向两侧坝缘侧积的特征(图8c,d)。舌形坝内部可由多期次坝体切割叠置而成,且每一期的侧积过程、方向及沉积体厚度与最终保留形态均存在一定程度的差异。

4.3 单元坝构型特征

单元坝是砂质辫状河中最典型的一类心滩,平面上一般呈对称或不对称椭圆状,迎水端与背水端形态往往比较“尖”(图9)。辫状水道呈交织状分布于单元坝之间,构成辫状河的基本样式。单元坝

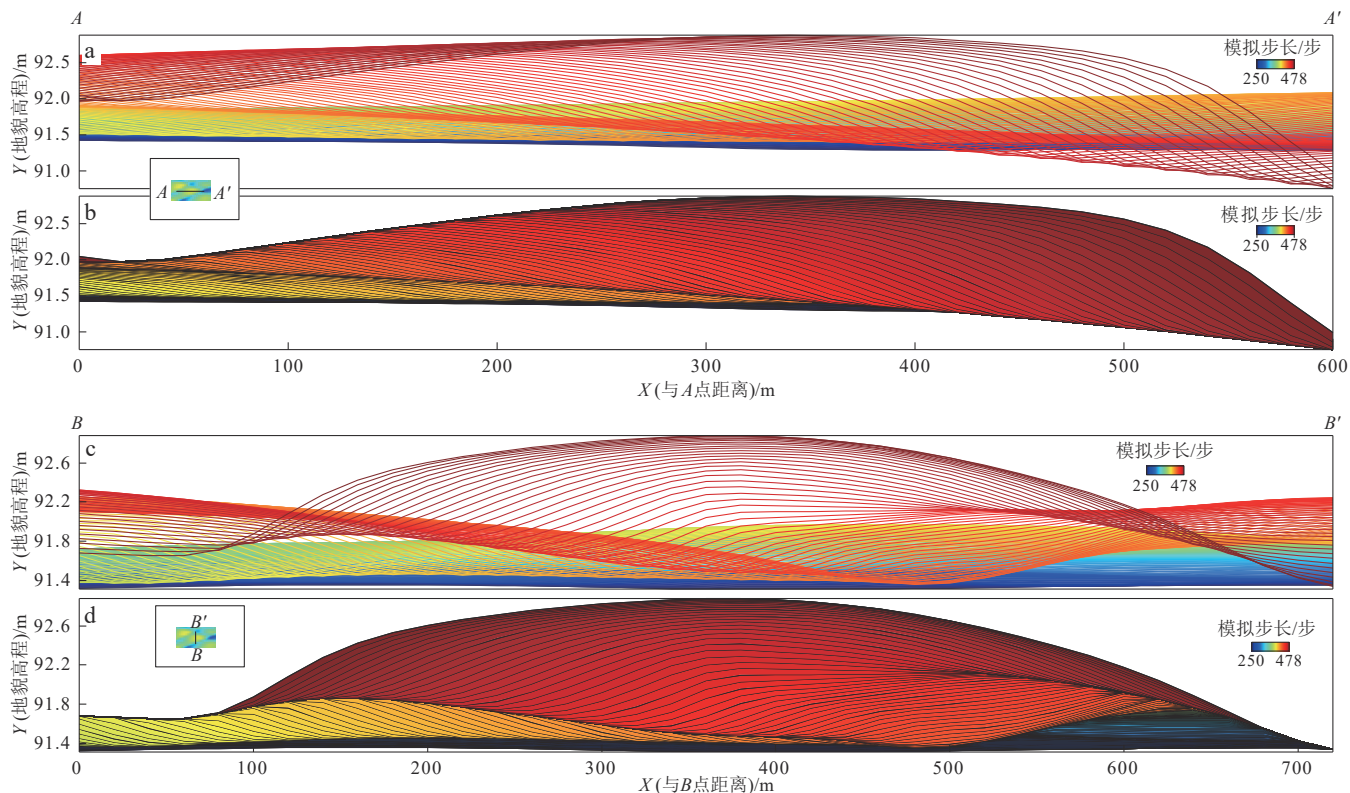


图7 菱形坝沉积构型剖面

Fig. 7 Sections showing the sedimentary architecture of a lozenge-shaped bar

a,b. 顺水流方向剖面; c,d. 横切水流方向剖面

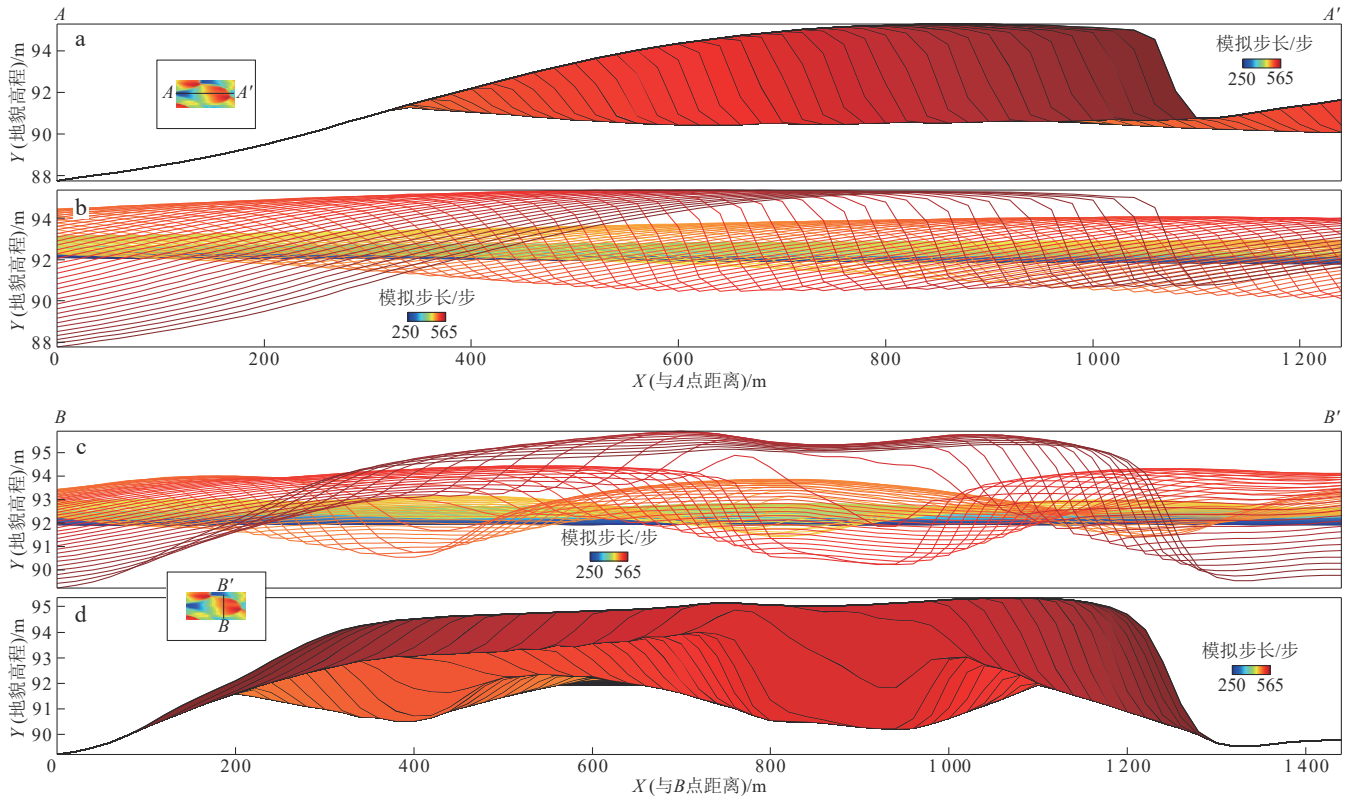


图8 舌形坝沉积构型剖面

Fig. 8 Sections showing the sedimentary architecture of a tongue-shaped bar

a, b. 顺水流方向剖面; c, d. 横切水流方向剖面

的剖面构型特征较菱形坝、舌形坝复杂,顺流剖面上可见多层前积、加积体切割叠置,一般底部前积体规模较大,向上厚度逐渐减薄,顶部变为薄层加积层(图9a, b);横切水流方向由多期次、不同方向的侧积体构成,侧积体的规模同样是下部较厚而上部较薄(图9c, d),侧积体由辫状水道迁移形成,但以心滩增生的方式被保存下来。

单元坝的形成往往比较连续,即在一个较短的时间范围内连续演化而成,往往不会经历多期次的沉积改造作用。

4.4 复合坝构型特征

复合坝的形成标志着辫状河的演化阶段由初始状态迈入成熟状态。单元坝形成后,其顶部往往可出露水面,随着演化的持续而逐步顺流向下游迁移并发生单元坝的“碰撞”合并,导致复合坝的形成。复合坝一般面积较大、厚度也较大,分布稳定,演化速率较低。平面上形态一般呈不规则的长椭圆状并仍保留迎水端与背水端。

复合坝的形成有赖于不同单元坝的向下游迁移速率差异,迁移速率较快的单元坝最终会与迁移速率较

慢的单元坝“碰撞”。因而,“碰撞”时机的差异决定了复合坝的构型特征,并表现为内部增生体形成时间、形态及结构的差异(图10)。

复合坝在顺流方向上由多个前积增生体垂向叠覆而成,坝内往往发育辫状水道,多为单元坝合并过程中的沉积产物(图10a, b)。各期增生体之间往往具有统一的增生体分界面,这些分界面处沉积速率较慢,多沉积泥岩,形成储层内部夹层。复合坝顶部发育较多小规模水道,为心滩表面的冲沟(图10a, b)。在切水流方向的剖面上,可见复合坝由不同时期、不同方向的侧积体复合而成,自下而上规模逐渐减小,表明在心滩复合的过程中,辫状水道的演化逐步成熟,水动力在河床内的分布也越来越趋于集中、局部水动力越来越强(图10c, d)。

4.5 改造复合坝构型特征

改造复合坝是在砂质辫状河演化成熟后,辫状水道-复合坝格局稳定的条件下,水流漫过坝顶发生局部侵蚀,从而受到局部改造而形成的大型复合坝体。这类坝体在平面上往往呈现大面积连续、连片的特点,

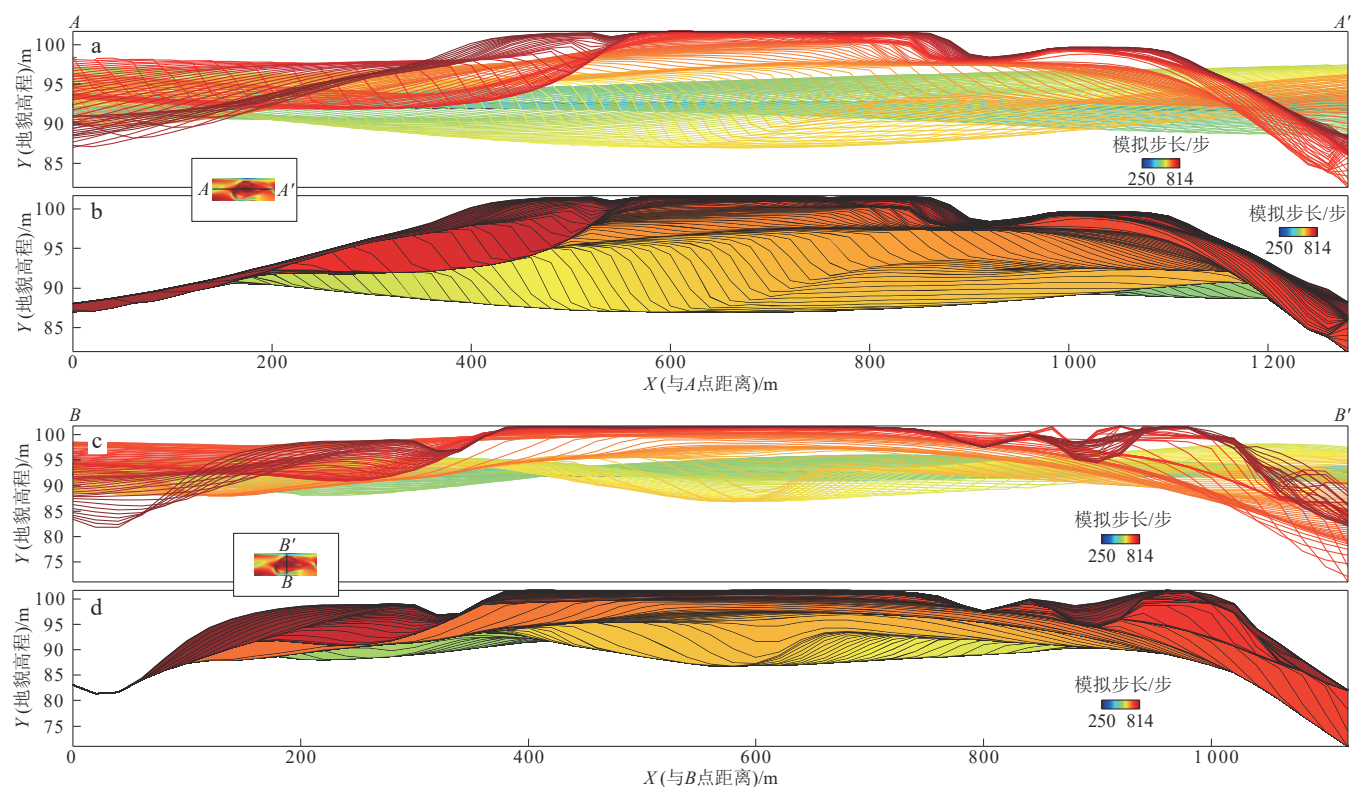


图9 单元坝沉积构型剖面

Fig. 9 Sections showing the sedimentary architecture of a unit bar

a, b. 顺水流方向剖面; c, d. 横切水流方向剖面

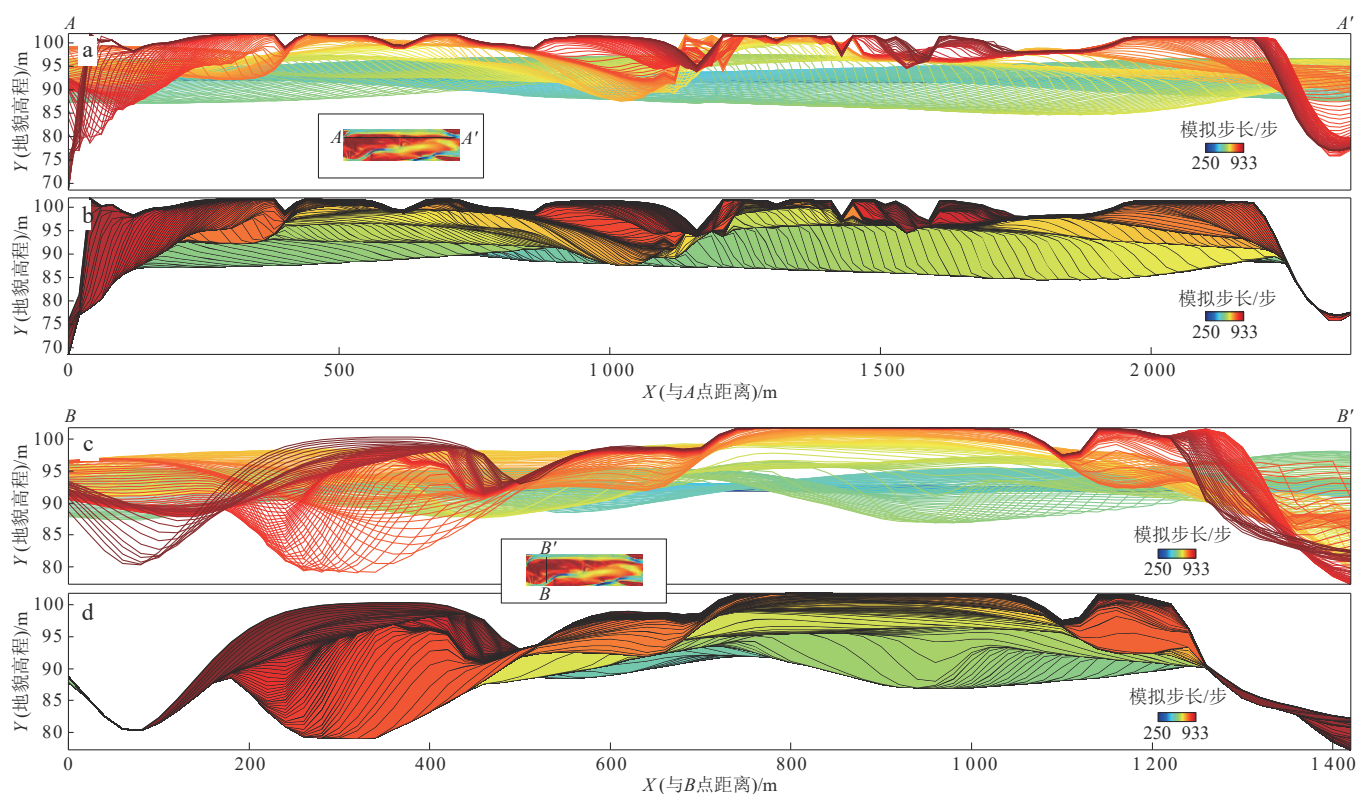


图10 复合坝沉积构型剖面

Fig. 10 Sections showing the sedimentary architecture of a composite bar

a, b. 顺水流方向剖面; c, d. 横切水流方向剖面

形态不规则,但其边缘能保持流线型(图11)。

在顺流剖面上,可见形成于演化早期至成熟期的各类增生体。越是早期的增生体,内部前积样式越单一,非均质性也越弱;而形成时间较晚的增生体则多呈现出较高角度的前积界面和较复杂的界面形态(图11a,b)。顺源方向上,复合坝自上游向下游,沉积厚度逐步减小。由于单元坝复合过程多造成单元坝相互接触的一侧水流阻塞,故改造复合坝的坝体中轴往往存在沉积物供给不足、水流汇聚冲刷作用,造成中轴线下部缺少沉积。因此,改造复合坝虽大面积连片,但其内部连续性自上游向下游逐步减

弱(图11a,b)。

在横切水流方向的剖面上,改造复合坝上游主体部位沉积厚度较大,内部可见复杂的切割叠置关系(图11c,d),主要沉积形成与演化过程的早、中期,至复合坝形成后,改造复合坝的新增沉积物和受侵蚀部位主要集中在坝体外缘(图11c,d)。整体上看,在辫状河演化成熟后,复合坝体剖面结构会变得十分复杂,既有河道沉积产生的侧积体,又有心滩增生产生的前/侧积体,切割叠置关系复杂,增生体规模差异较大,坝体顺流方向上呈现出明显的地形、沉积特征及构型样式差异(图11)。

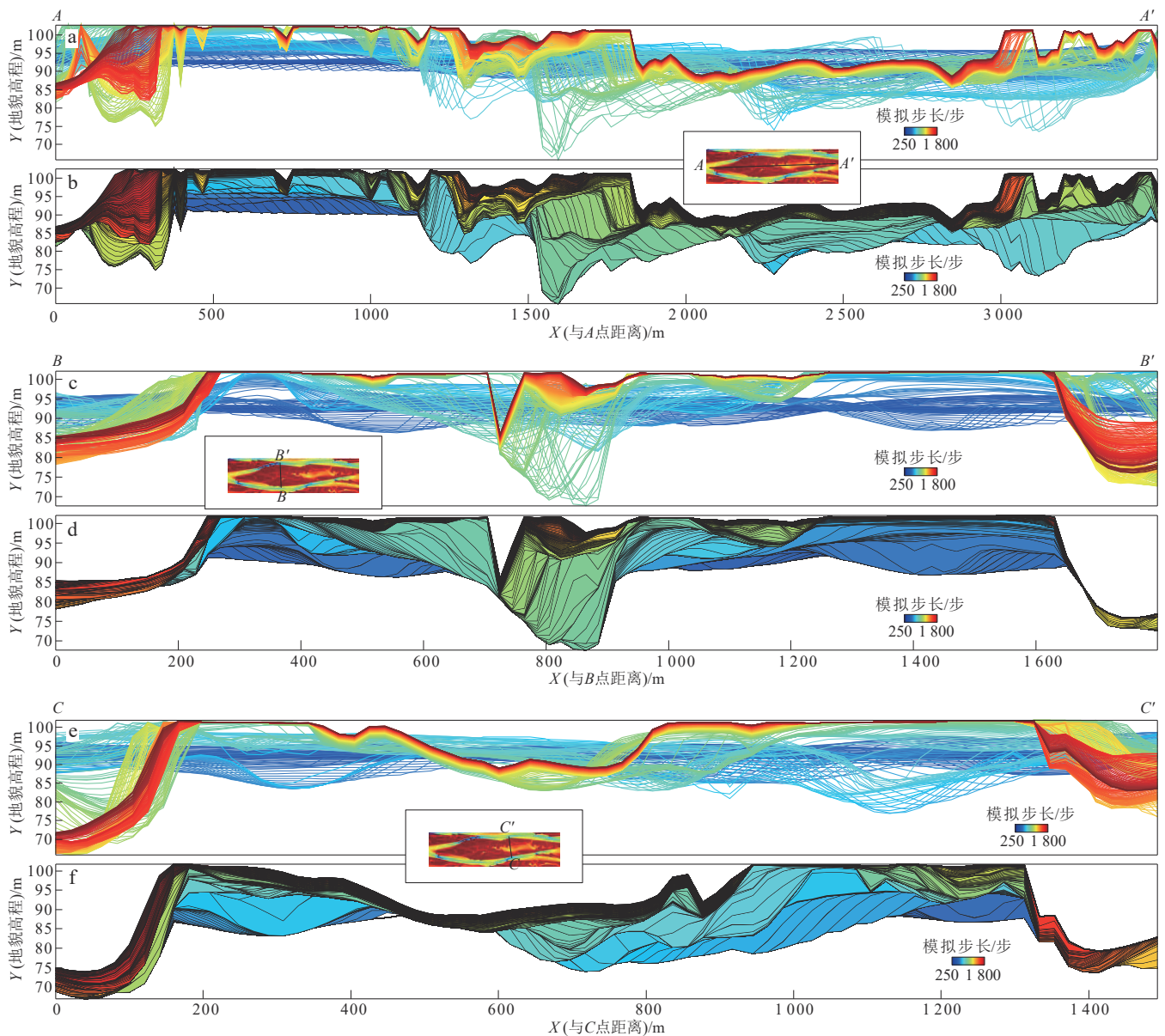


图11 复合改造坝沉积构型剖面

Fig. 11 Sections showing the sedimentary architecture of a reworked composite bar

a, b. 顺水流方向剖面; c—f. 横切水流方向剖面

5 结论与认识

1) 沉积数值模拟再现了稳定边界条件下的砂质辫状河连续演化过程,表现为沙坝雏形形成并逐步增生、迁移、变形,最终形成成熟稳定的心滩与辫状河道体系。

2) 在辫状河演化过程中,根据心滩形态、规模及分布样式可识别出5种类别,按照发育先后顺序分别为菱形坝、舌形坝、单元坝、复合坝及改造复合坝。伴随着心滩的演化,辫状河道由短程、不连续且广泛分布的冲刷沟逐渐延长、拓宽,形成辫状交织的河网,并在复合坝形成后与坝顶窄沟共同形成复杂的河网体系。

3) 从菱形坝的发育到复合坝的形成,辫状河心滩的长度和宽度逐步增大,进入改造复合坝发育阶段后心滩长度和宽度逐步趋于稳定。心滩长宽比演变过程存在“三段式”特征,在菱形坝发育阶段长宽比约为2.50,而在舌形坝发育阶段仅为1.75,在单元坝-复合坝发育阶段由2.00快速增加到4.00,并在改造复合坝发育阶段缓慢增加到5.00后保持稳定。

4) 心滩一般由顺源加积体、侧向加积体及垂向加积体构成,其中菱形坝主要由顺源加积体构成,舌形坝和单元坝主要由顺源加积体与侧向加积体构成,复合坝及改造复合坝自下而上由加积体、侧积体逐渐转变为加积体。在辫状河形成与演化过程中,心滩内部增生体数量与类型逐步增加,叠切关系复杂度及其控制的非均质性逐步增强。

致谢:在论文投稿阶段,我们收到了编辑部和两位匿名审稿专家的评审意见和建议。两位专家对我们的工作进行了仔细的审阅,给出了非常专业、详尽且建设性的建议,这对我们提高论文质量和科学性非常有帮助,在此我们衷心感谢编辑部和两位专家的付出。

参 考 文 献

- [1] 于兴河. 碎屑岩系油气储层沉积学[M]. 2版. 北京: 石油工业出版社, 2008: 379-380.
YU Xinghe. Sedimentology of oil and gas reservoirs in clastic rock series [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 379-380.
- [2] 张金亮. 河流沉积相类型及相模式[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(2): 244-252.
ZHANG Jinliang. Fluvial facies styles and their sedimentary facies models [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(2): 244-252.
- [3] 樊晓伊. 准噶尔盆地春光探区古近系浅水辫状河三角洲沉积特征[J]. 特种油气藏, 2022, 29(4): 47-54.
FAN Xiaoyi. Sedimentary Characteristics of Paleogene Shallow Braided River Delta in Chunguang Prospect Area Junggar Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(4): 47-54.
- [4] 刘阳平, 吴博然, 于忠良, 等. 辫状河砂岩储层三维地质模型重构技术: 以冀东油田高尚堡区块新近系馆陶组为例[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(4): 159-170.
LIU Yangping, WU Boran, YU Zhongliang, et al. Reconstruction of 3D geological model of braided river sandstone reservoirs: A case study of Neogene Guantao Formation in Gaoshangpu block, Jidong Oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(4): 159-170.
- [5] 申春生, 胡治华, 林国松, 等. 渤海PL油田浅水辫状河三角洲沉积模式[J]. 石油地质与工程, 2022, 36(6): 28-32.
SHEN Chunsheng, HU Zhihua, LIN Guosong, et al. Sedimentary mode of shallow braided river delta in PL oilfield of Bohai [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2022, 36(6): 28-32.
- [6] 邵志芳, 李伟才, 黄煜旸, 等. 春光油田沙湾组多期次辫状河沉积单砂体识别与刻画[J]. 石油地质与工程, 2021, 35(6): 18-24.
SHAO Zhifang, LI Weicai, HUANG Yuyang, et al. Identification and characterization of multi-stage braided river sedimentary single sand bodies of Shawan formation in Chunguang exploration area [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2021, 35(6): 18-24.
- [7] 郅莹, 王建立, 马佳国, 等. 井震联合分析技术在复杂河流相储层刻画中的应用[J]. 断块油气田, 2021, 28(5): 641-644.
QIE Ying, WANG Jianli, MA Jiaguo, et al. Application of combined well-seismic analysis technology in complex fluvial reservoir characterization [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(5): 641-644.
- [8] 陈科, 张旭东, 何伟, 等. 河流相储层渗透率对水驱微观驱替效果的影响及挖潜方向研究[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(5): 694-702.
CHEN Ke, ZHANG Xudong, HE Wei, et al. Influence of micro displacement effect of permeability on water flooding and the direction of tapping potential of fluvial reservoir [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5): 694-702.
- [9] 夏钦禹, 吴胜和, 冯文杰, 等. 同生逆断层伴生褶皱对冲积扇片状砂砾体及辫状水道沉积的控制——以准噶尔盆地西北缘湖湾区三叠系克拉玛依组为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 509-521.
Xia Qinyu, Wu Shenghe, Feng Wenjie, et al. Controlling effects of syn depositional reverse fault associated folds on the deposition in alluvial fan sheet glutenites and braided channels: A case study of the Triassic Karamay Formation in Huwan area, northwestern margin of Junggar Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 509-521.
- [10] 孙光远, 王哲麟, 刘培刚, 等. 碱性长石溶蚀微孔发育特征及其对致密砂岩储层物性的改造作用——以鄂尔多斯盆地华庆

- 地区三叠系延长组6段3亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 658–669.
- SUN Guangyuan, WANG Zhelin, LIU Peigang, et al. Dissolved micro-pores in alkali feldspar and their contribution to improved properties of tight sandstone reservoirs: A case study from Triassic Chang-63 sub-member, Huaqing area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 658–669.
- [11] 李进步, 崔越华, 黄有根, 等. 鄂尔多斯盆地低渗-致密气藏水平井全生命周期开发技术及展望[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 480–494.
- LI Jinbu, CUI Yuehua, HUANG Yougen, et al. Technologies and prospect of full-cycle development of low-permeability tight gas reservoirs with horizontal wells, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 480–494.
- [12] 吴高奎, 张忠民, 林畅松, 等. 塔里木盆地塔北隆起区中生界沉积演化特征[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 845–858.
- WU Gaokui, ZHANG Zhongmin, LIN Changsong, et al. Evolution of Mesozoic sedimentary fill in the Tabei uplift region, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 845–858.
- [13] 张昌民, 张尚锋, 李少华, 等. 中国河流沉积学研究20年[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 183–192.
- ZHANG Changmin, ZHANG Shangfeng, LI Shaohua, et al. Advances in Chinese fluvial sedimentology from 1983 to 2003 [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(2): 183–192.
- [14] 张昌民, 朱锐, 赵康, 等. 从端点走向连续: 河流沉积模式研究进展述评[J]. 沉积学报, 2017, 35(5): 926–944.
- ZHANG Changmin, ZHU Rui, ZHAO Kang, et al. From end member to continuum: Review of fluvial facies model research [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 926–944.
- [15] CANT D J, WALKER R G. Fluvial processes and facies sequences in the sandy braided South Saskatchewan River, Canada [J]. Sedimentology, 1978, 25(5): 625–648.
- [16] MIALD A D. Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. Earth-Science Reviews, 1985, 22(4): 261–308.
- [17] LI Shunli, YU Xinghe, CHEN Binta, et al. Quantitative characterization of architecture elements and their response to base-level change in a sandy braided fluvial system at a mountain front [J]. Journal of Sedimentary Research, 2015, 85(10): 1258–1274.
- [18] 杨丽莎, 陈彬滔, 李顺利, 等. 基于成因类型的砂质辫状河泥岩分布模式——以山西大同侏罗系砂质辫状河露头为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(1): 93–98.
- YANG Lisha, CHEN Binta, LI Shunli, et al. Pattern of genesis-based mudstone distribution for sandy braided river: A case study of sandy braided-river outcrop, Datong, Shanxi Province, China [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(1): 93–98.
- [19] 陈彬滔, 于兴河, 王磊, 等. 河流相沉积的河型转换特征与控制因素及其油气地质意义——以南苏丹Melut盆地Ruman地区坳陷期Jimidi组为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(2): 424–433.
- CHEN Binta, YU Xinghe, WANG Lei, et al. Features and controlling factors of river pattern transition in fluvial deposition and its significance for petroleum geology: An insight from the Jimidi Formation in the Ruman area, Melut Basin, South Sudan [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(2): 424–433.
- [20] 何顺利, 兰朝利, 门成全. 苏里格气田储层的新型辫状河沉积模式[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 25–29.
- HE Shunli, LAN Chaoli, MEN Chengquan. New braided river model in Sulige Gas Field of Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 25–29.
- [21] 王越, 陈世悦, 李天宝, 等. 扒楼沟剖面二叠系辫状河砂体构型与非均质性特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 1–8.
- WANG Yue, CHEN Shiyue, LI Tianbao, et al. Braided river sand body architecture and heterogeneity of Permian in Palougou outcrop [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(6): 1–8.
- [22] 金振奎, 杨有星, 尚建林, 等. 辫状河砂体构型及定量参数研究——以阜康、柳林和延安地区辫状河露头为例[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(3): 311–317.
- JIN Zhenkui, YANG Youxing, SHANG Jianlin, et al. Sandbody architecture and quantitative parameters of single channel sandbodies of braided river: Cases from outcrops of braided river in Fukang, Liulin and Yanan areas [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(3): 311–317.
- [23] ASHMORE P E. Laboratory modelling of gravel braided stream morphology [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1982, 7(3): 201–225.
- [24] ASHWORTH P J, BEST J L, JONES M. Relationship between sediment supply and avulsion frequency in braided rivers [J]. Geology, 2004, 32(1): 21–24.
- [25] FIELDING C R, ALEXANDER J, ALLEN J P. The role of discharge variability in the formation and preservation of alluvial sediment bodies [J]. Sedimentary Geology, 2018, 365: 1–20.
- [26] HOEY T B, SUTHERLAND A J. Channel morphology and bedload pulses in braided rivers: A laboratory study [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1991, 16(5): 447–462.
- [27] MAO L, RAVAZZOLO D, BERTOLDI W. The role of vegetation and large wood on the topographic characteristics of braided river systems [J]. Geomorphology, 2020, 367: 107299.
- [28] OKAZAKI H, KWAK Y, TAMURA T. Depositional and erosional architectures of gravelly braid bar formed by a flood in the Abe River, central Japan, inferred from a three-dimensional ground-penetrating radar analysis [J]. Sedimentary Geology, 2015, 324: 32–46.
- [29] POSTMA G, KLEINHANS M G, MEIJER P T, et al. Sediment transport in analogue flume models compared with real-world sedimentary systems: A new look at scaling evolution of sedimentary systems in a flume [J]. Sedimentology, 2008, 55

- (6): 1541-1557.
- [30] ZHANG Xianguo, LIN Chengyan, ZHANG Tao, et al. New understanding of bar top hollows in dryland sandy braided rivers from outcrops with unmanned aerial vehicle and ground penetrating radar surveys [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13 (4): 560.
- [31] 刘波, 赵翰卿, 李广月, 等. 储层砂质辫状河的识别——以大庆喇嘛甸-萨尔图油田西部PI₂³为例[J]. *石油学报*, 2002, 23 (2): 43-47.
- LIU Bo, ZHAO Hanqing, LI Guangyue, et al. Sand body identification of braided river reservoir——An example from the PI₂³ west of Lamadian-Saertu Oilfield, Daqing, China [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2002, 23(2): 43-47.
- [32] 刘钰铭, 侯加根, 王连敏, 等. 辫状河储层构型分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(1): 7-11, 17.
- LIU Yuming, HOU Jiagen, WANG Lianmin, et al. Architecture analysis of braided river reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2009, 33 (1): 7-11, 17.
- [33] 徐中波, 申春生, 陈玉琨, 等. 砂质辫状河储层构型表征及其对剩余油的控制——以渤海海域P油田为例[J]. *沉积学报*, 2016, 34(2): 375-385.
- XU Zhongbo, SHEN Chunsheng, CHEN Yukun, et al. Architecture characterization for sandy braided river reservoir and controlling factors of remaining oil distribution——A case study of P Oilfield (Neogene), Bohai offshore, China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(2): 375-385.
- [34] 郭智, 贾爱林, 何东博, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田辫状河体系带特征[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(2): 197-204.
- GUO Zhi, JIA Ailin, HE Dongbo, et al. Characteristics of braided river sedimentary system zones in Sulige Gasfield, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(2): 197-204.
- [35] EDMONDS D A, SHAW J B, MOHRIG D. Topset-dominated deltas: A new model for river delta stratigraphy [J]. *Geology*, 2011, 39(12): 1175-1178.
- [36] LI Wei, COLOMBERA L, YUE Dali, et al. Controls on the morphology of braided rivers and braid bars: An empirical characterization of numerical models [J]. *Sedimentology*, 2023, 70(1): 259-279.
- [37] SCHUURMAN F, TA Wanquan, POST S, et al. Response of braiding channel morphodynamics to peak discharge changes in the Upper Yellow River [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(8): 1648-1662.
- [38] ZHANG Ke, WU Shenghe, FENG Wenjie, et al. Bar dynamics in a sandy braided river: Insights from sediment numerical simulations [J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 396: 105557.
- [39] 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.
- [40] 张可, 吴胜和, 冯文杰, 等. 砂质辫状河心滩坝的发育演化过程探讨——沉积数值模拟与现代沉积分析启示 [J]. *沉积学报*, 2018, 36(1): 81-91.
- ZHANG Ke, WU Shenghe, FENG Wenjie, et al. Discussion on evolution of bar in sandy braided river: Insights from sediment numerical simulation and modern bar [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(1): 81-91.
- [41] 肖培青, 姚文艺. 泥沙搬运能力方程的比较分析 [J]. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 6-8.
- XIAO Peiqing, YAO Wenyi. Comparison and analysis of sediment transportation equations [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(4): 6-8.
- [42] SCHUURMAN F, KLEINHANS M G. Bar dynamics and bifurcation evolution in a modelled braided sand-bed river [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(10): 1318-1333.
- [43] 田景春, 吴琦, 王峰, 等. 鄂尔多斯盆地石盒子组盒8段储集砂体发育控制因素及沉积模式研究 [J]. *岩石学报*, 2011, 27 (8): 2403-2412.
- TIAN Jingchun, WU Qi, WANG Feng, et al. Research on development factors and the deposition model of large area reservoir sandstones of He 8 section of Xiashihezi Formation of Permian in Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (8): 2403-2412.
- [44] SCHUURMAN F, MARRA W A, KLEINHANS M G. Physics-based modeling of large braided sand-bed rivers: Bar pattern formation, dynamics, and sensitivity [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2013, 118(4): 2509-2527.

(编辑 张亚雄)