

不同流量砂质辫状河沉积演化与构型差异解析

——基于沉积数值模拟实验研究

郭颖^{1,2}, 陈奎², 高青松², 任广磊², 李少华¹, 冯文杰¹, 刘林松², 冉辉²

1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2. 中国石化华北油气分公司勘探开发研究院, 郑州 450006

摘要 【目的】辫状河的沉积演化、形态及规模, 受流量这一关键因素的影响, 但目前尚未系统分析其对辫状水道、心滩及内部结构影响程度。【方法】采用 Delft3D 软件通过 5 组不同流量三维沉积数值模拟实验, 探究不同流量下辫状水道、心滩的演化、形态样式及规模差异, 再现不同流量辫状河多沉积类型砂坝内部叠置样式和构型特征, 总结砂质辫状河沉积特征和演化规律。【结果】(1) 流量与辫状河的沉积演化速率成正比。低流量辫状河演化程度低, 砂坝以向下迁移为主, 不易被河道分割; 而高流量辫状河演化程度高, 砂坝以侧向迁移为主, 心滩合并、被分割的动态平衡过程较普遍。(2) 流量是决定辫状水道平面样式和水深的主导因素。流量越大, 河道越宽、直、深, 分岔少, 演化成熟阶段辫状水道网络复杂; 而流量较小的辫状河河道, 河道水浅、窄、分岔多, 演化成熟阶段辫状水道以相对固定的交织河网为主。(3) 流量进一步影响辫状水道和心滩的协同演化过程。流量越大, 心滩样式更复杂, 出现规模较大的复合改造坝和河边滩, 其内部叠切关系更复杂, 更易发育窄沟。(4) 虽然砂质辫状河心滩内部结构具有很强的空间变异性, 但仍存在相似点。相同点在于自下而上均发育顺流加积体、侧积体、垂向加积体, 不同点在于流量越大, 心滩内部侧积体占比增加。(5) 流量与增生体规模呈正相关, 但与长宽比、长厚比呈反相关, 其中低流量辫状河心滩长宽比中位数为 3.5, 高流量辫状河心滩长宽比为 4.5。【结论】提出了流量与砂质辫状河的心滩及内部增生体的规模成正比的观点, 明确了砂质辫状河受流量影响沉积特征和规模差异, 为地下复杂储层构型解剖提供依据。

关键词 沉积数值模拟; 流量; 辫状河; 沉积演化; 构型解剖

第一作者简介 郭颖, 女, 1992 年出生, 博士研究生, 储层沉积学, E-mail: guoying.hbsj@sinopec.com

通信作者 李少华, 男, 教授, E-mail: lish@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

0 引言

砂质辫状河为低弯度、河床坡降大、河道水浅流急易分岔合并、频繁迁移改道的常见河流地貌^[1-4], 储层以粗粒岩性为主体、多低渗缓冲带的强非均质性、整体泛连通但内部呈结构复杂的迷宫状结构^[5-6]。辫状水道与心滩是砂质辫状河的主要沉积单元^[7-8], 受异源因素 (allogenic) 的影响^[9], 如植被、气候控制的流量变化等, 辫状河形态和保存的沉积序列存在明显差异, 其中流量对河流沉积的影响被认为是至关重要的^[10-11]。即使古气候古沉积背景

相似,仍存在形态规模、内部构型样式差异很大的辫状河,认为是流量差异造成上游的供水条件不同,导致同一个地区出现多条不同类型的辫状河共存的现象^[12]。如鄂尔多斯盆地地下石盒子组辫状河,其坡度、沉积物成分、沉积物粒度等基本沉积背景相近,但在流量等方面,不同时期、发育于不同位置的辫状河存在较大的差异,在既往对下石盒子组辫状河储层的解剖研究中,已发现流量不同的辫状河,河道的宽度、砂体的规模存在一定程度的差异^[13-14]。

许多学者意识到流量对辫状河是至关重要的,但仅定性地提出流量影响心滩的沉积演化和规模,没有系统对辫状水道、心滩及内部结构定量评价。其中 Fielding *et al.*^[15-16]认识到洪峰流量与保存下来的沉积物存在很强的相关性,可作为评价河流流量变化的度量,对沉积物的搬运、沉积构造的发育以及沉积特征的保存具有重要意义。刘警阳等^[17]基于现代沉积对比提出流量的差异会控制心滩的沉积演化,进一步影响其形态,认为低流量辫状河的心滩和辫状水道之间交互作用较弱,形态可以维持相对稳定;而高流量辫状水道对心滩形态的改造作用很强烈,导致心滩发育位置变化明显,辫状水道常发生迁移改道,多为游荡型辫状河。李伟等^[18]基于多组沉积模拟提出流量对心滩的规模有控制作用。与此同时,大多数现代河流测量时间不够长,任一洪水事件形成的沉积结构会被后续的洪水改造使其不具有代表性。Nicholas^[19]开展了物理模拟、探地雷达与取心对比,使在较大的时间和空间尺度上模拟河道形态动力具有可行性。

因此,本研究采用 Delft3D 软件通过多组不同流量三维沉积数值模拟实验进行时空迁移分析,探究不同流量下辫状水道、心滩及内部增生体的类型、规模等差异,明确了流量对砂质辫状河的叠置样式、构型特征与内部非均质性的影响,对高效开发地下油气砂体分布预测提供模式指导。

1 数据和方法

水动力条件是影响河流沉积演化的关键边界条件,在沉积底床、河床形态、沉积物类型与粒度等边界条件相同的情况下,水动力强度的变化可引起辫状河水深、流速等水动力参数的变化,进而对辫状河沉积模拟产生决定性影响。为了明确水动力强度对砂质辫状河沉积的控制作用,通过 Delft3D 软件设计不同流量的对照方案开展沉积数值模拟,以探索不同流量条件下辫状河沉积特征及其差异。

1.1 模拟参数设置

模拟参数设置主要包含网格参数、粒度选择和水动力参数三个方面,其中网格参数设计是基于研究区同盆地苏里格气田及府谷天生桥露头同层位辫状河单砂体解剖成果^[4],结合

单期增生体的最小几何尺度约束，将模拟网格尺寸设定为 50 m×20 m。该设计确保每期沉积单元可覆盖 4~5 个网格，满足增生体空间展布的精度需求。粒度数据选取整合了地表露头与地下岩心的对比分析，其中府谷天生桥露头 18 组样品测试显示，岩心粒度中值为 300 μm；鄂尔多斯盆地北缘石盒子组砂质辫状河 293 个地下样品分析表明，峰值粒径为 320 μm，与露头数据趋势吻合。据此采用露头数据为基准，按细砂（25%）、中砂（50%）、粗砂（15%）、巨砂（10%）的组分比例调配沉积物，使中值粒径趋近 300 μm。水动力参数上，通过筛选全球典型现代砂质辫状河案例（粒度 0.2~0.4 mm、缓坡区坡度 0.05°~0.15°、河道宽度 1~10 km），结合中国水利部砂泥比参数（0.02），最终确定模拟输沙量为 2.5 kg/m³，实现沉积动力学过程定量约束。

模拟区为宽 3.2 km，长 80 km 的矩形，模拟区左侧边界为进水口，右侧边界为出水口（图 1），模拟过程中总流量保持恒定。流量是单位时间内流经封闭管道有效截面的流体量，现代河流中根据流量均衡原理，流量增加往往辫状河河道更宽。但在模拟中采用槽型模拟区固定宽度 3.2 km，调研现代沉积 13 条河流的流量数据，计算单位宽度流量为等效流量，数据范围从 0.09~16.9 m²/s（表 1）。以此参考设计总流量在 5 000~80 000 m³/s 为变量对照组试验模拟了 5 条辫状河，其主要沉积背景条件相同，其他参数不变开展五组沉积模拟（表 2）。

表 1 砂质辫状河流量等参数调研（水文站数据据文献[17]）

Table 1 Hydrological parameter survey of sandy braided river (data from hydrometric stations^[17])

| 序号 | 河流 | 位置 | 水文站 | 平均洪峰流量 m ³ /s | 河道宽度 m | 宽度测量坐标 | 等效流量 m ² /s |
|----|-----------------|-----|----------------------|--------------------------|--------|--------------------------|------------------------|
| 1 | 亚马孙河 | 巴西 | Santo Antonio Do Ica | 68 192.99 | 10 532 | 59°42'48''W-3°2'52''S | 6.47 |
| 2 | 巴拉那河 | 阿根廷 | Corrientes | 21 917.69 | 1 722 | 63°13'51''W-23°47'27''S | 12.73 |
| 3 | 马更些河 | 加拿大 | Norman Wells | 18 130.55 | 2 811 | 111°32'40''W-59°26'18''N | 6.45 |
| 4 | 贾木纳河 | 印度 | Bahadurabad | 50 531.08 | 3 140 | 84°38'41''E-25°19'54''N | 16.09 |
| 5 | 恒河 | 印度 | Farakka | 44 419.30 | 5 136 | 80°29'20''E-18°0'28''N | 8.65 |
| 6 | Rakaia river | 新西兰 | Fighting Hill | 398.31 | 606 | 168°18'23''E-45°55'10''N | 0.66 |
| 7 | 育空河 | 美国 | Ruby, Alas. | 12 966.21 | 4 914 | 131°5'29''W-67°3'4''N | 2.64 |
| 8 | 维斯瓦河 | 波兰 | Warsaw | 1 151.13 | 1 350 | 20°21'18''E-52°22'20''N | 0.85 |
| 9 | 奈厄布拉勒河 | 美国 | Near Verdel, Nebr | 98.11 | 1 787 | 107°34'12''W-46°6'58''N | 0.05 |
| 10 | 南萨斯喀彻温河 | 加拿大 | Saskatoon | 846.79 | 550 | 111°32'52''W-56°50'2''N | 1.54 |
| 11 | 松花江 | 中国 | 哈尔滨 | 3 397.06 | 3 230 | 129°2'26''E-45°46'11''N | 1.05 |
| 12 | 普拉特河 | 美国 | Louisville, Nebr | 534.69 | 2 266 | 77°14'46''W-42°40'20''N | 0.24 |
| 13 | Halil Rud river | 伊朗 | Hossein Abad Jiroft | 36.40 | 407 | 57°44'56''E-28°24'20''N | 0.09 |

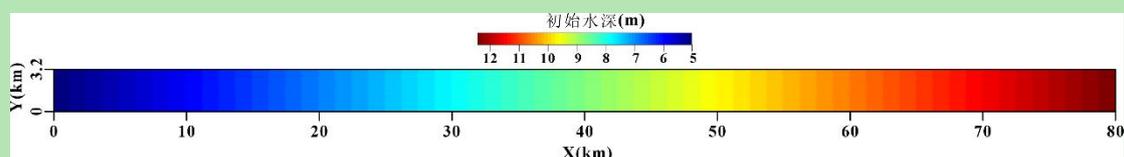


图 1 砂质辫状河模拟网格与初始水深分布
 Fig.1 Grid and initial water depths for numerical simulation of braided rivers
 表 2 砂质辫状河沉积数值模拟参数
 Table 2 Parameters for numerical simulation of a sandy braided river

| 参数项 | 模拟设定值 | | | | | 说明 |
|---|----------------------|-------------|--------------|---------------|--------|----------------------------------|
| 沉积物粒度中值/ μm | 300 | | | | | — |
| 泥质沉积物供应量/ (kg/m^3) | 10 | | | | | 参考现代沉积数据 |
| 砂质沉积物浓度/ (kg/m^3) | 2.5 | | | | | |
| 沉积物组分 | 细砂 | 中砂 | 粗砂 | 巨砂 | | 多种组分混合后中值粒径约为 $300\ \mu\text{m}$ |
| 砂质沉积物组分粒度中值/ μm | 150 | 300 | 750 | 1 500 | | |
| 砂质沉积物组分含量 (质量占比, %) | 25 | 50 | 15 | 10 | | |
| 沉积物浓度/ (kg/m^3) | 1.25 | 2.5 | 0.75 | 0.5 | | |
| 砂质沉积物密度/ (g/cm^3) | 2.65 | | | | | — |
| 底床坡度/ $^\circ$ | 9.3×10^{-5} | | | | | 冲积平原坡度平缓 |
| 河道宽度/ km | 3.2 | | | | | — |
| 水流量/ (m^3/s) | 5 000 | 10 000 | 20 000 | 40 000 | 80 000 | 变量 |
| 等效流量 | 1.56 | 3.12 | 6.25 | 12.5 | 25.0 | m^2/s |
| 参考河流 | 南萨斯喀 彻温河 1.54 | 育空河 2.64 | 亚马孙河 6.47 | 贾木纳河 16.09 | / | — |
| 演化成熟步长 | 3 890 | 2 990 | 1 500 | 1 100 | 880 | — |
| 平均水深/ m | 4~6 | | | | | 取决于河宽、底床坡度及水 |
| 控制流速/ (m/s) | 0~4.5 | | | | | — |
| 网格单元大小/ m | 50×20 | | | | | — |
| 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 | | | | | 沉积模拟加速 48 倍 |
| 底床糙度-chezy 值/ $(\text{m}^{1/2}/\text{s})$ | 45 | | | | | 经验参数 |
| 水平涡粘系数/ $(\text{m}^2/\text{s})^*$ | 1 000 | | | | | — |
| 垂向涡粘系数/ $(\text{m}^2/\text{s})^*$ | 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 | | | | | — |

注：“—”表示无补充说明。

1.2 构型分析方法

为了分析辫状河的形态动力学和沉积特征，采用 MATLAB 编程对沉积模拟数据处理，具体分为四个步骤：①根据设置沉积物厚度等参数计算初始地形；②在模拟域内定义一个剖面，并提取所定义剖面的坐标和地形；③通过考虑动态侵蚀和沉积过程，将现步长与前一个步长之间的地形差作为不同步长下泥沙增厚的分布范围，计算每个模拟步骤中最终保存的沉积体的地形，作为暂存的沉降量；④采用 Straub *et al.*^[20]和 Van De Lageweg *et al.*^[21]提出的方法计算每个步长最终保留边界高程，绘制沉积构型剖面^[22]。此外，沿剖面提取沉积物粒度数据，并绘制在沉积构型图内。根据绘制的剖面，识别和测量了不同构型要素、规模、位置和倾斜度，包括增生体、心滩和辫状水道。

2 流量对辫状河沉积演化的影响

2.1 不同流量下辫状河演化相似性

在沉积数值模拟中,改变流量等参数得到的辫状河模拟结果虽不同,但辫状河的形态动力学与砂坝和河道的协同演化有关,使演化过程仍具有相似性^[23]。对比五组沉积模拟,认为辫状河演化可分为四个阶段:(1)底床砂在水流的推动作用下形成了不稳定的菱形坝、舌形坝和不连续的水道;(2)顺水流的加积作用形成朵叶状、短陡迎水面和长缓背水面单元坝及相对规则、宽、浅的辫状水道;(3)多个单元坝开始顺流生长或横向“碰撞”形成不对称条形、规模中等的复合坝,此时辫状水道更加连通,形成相对复杂稳定的河网^[24-26];(4)一种是辫状河道被充填,多个单元坝、复合坝碰撞形成规模最大的复合改造坝,另一种是复合坝会被河道切割形成单元坝,与此同时,河道相对稳定,坝顶受到漫溢水流的侵蚀改造使窜沟较发育^[27]。

2.2 不同流量下辫状河演化差异

2.2.1 流量影响辫状河演化速率

流量与辫状河演化速率呈正相关,高流量辫状河演化时间在较短时间内就达到了演化成熟阶段,低流量辫状河达到相同的沉积量需要时间增加,也就是说时长和流量成反比。以总流量为 $40\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 辫状河为例(图 2f),在 1 100 模拟步长后辫状河的形态不再发生变化,达到演化成熟阶段,而总流量为 $5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 辫状河心滩增长速率越慢,需要 2 000~4 000 个模拟步才能达到演化成熟阶段。

2.2.2 流量影响辫状河演化过程

不同流量下辫状河演化过程有明显差异,低流量的辫状河($5\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 对应南萨斯喀彻温河)演化以前三个阶段为主,演化成熟后不发育复杂改造坝,而高流量辫状河水动力强,在沉积末期易出现河道被充填或改道,会出现规模较大的复杂改造坝或规模较小的单元坝。这是因为在演化第三个阶段,低流量辫状河是以多个单元坝以顺流生长或“向下游碰撞”形成长条形心滩为主体(图 3a~c),此时已形成相对稳定且连通的河道,使后续心滩合并、分割的动态平衡阶段不发育(图 2a~c)。高流量的辫状河在演化的第三个阶段,多个单元坝以横向“碰撞”为主(图 3d~f),单元坝和单元坝碰撞的位置往往存在次级水流,形成不对称、尾部分岔、拉长的椭圆形心滩,河道宽、深、相对连续,心滩头部受水流侵蚀,继续向下迁移,出现复合改造坝或单元坝,在心滩的中部或尾部往往发育多个窜沟(图 2d~f)。

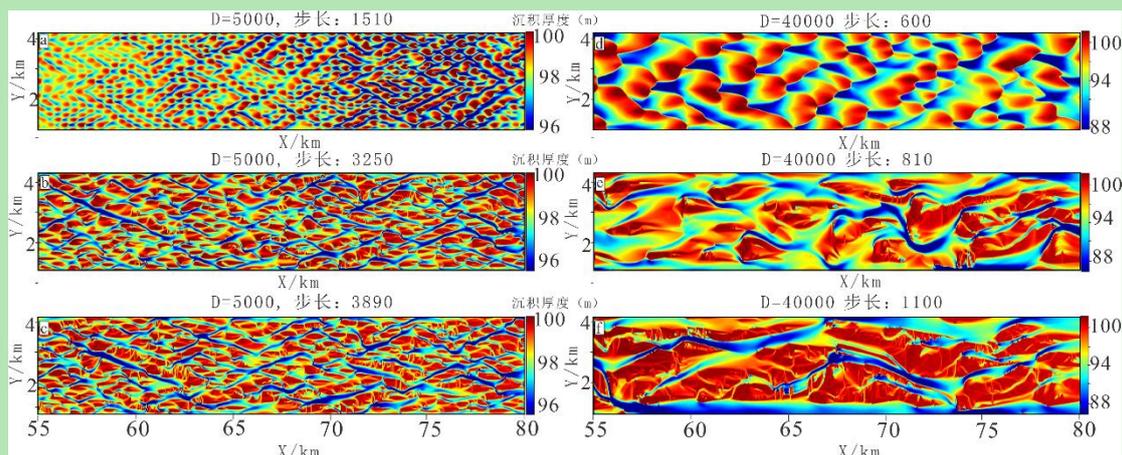


图2 高、低流量砂质辫状河演化过程对比

(a-c) 第 1 510、3 250、3 890 步长下低流量砂质辫状河沉积地貌图；(d, f) 第 600、810、1 100 步长下高流量砂质辫状河沉积地貌图

Fig.2 Simulated sedimentary evolution of high- and low-discharge sandy braided rivers, showing depositional geomorphology

(a-c) low-discharge rivers at steps 1 510, 3 250 and 3 890; (d, f) high-discharge rivers at steps 600, 810 and 1 100

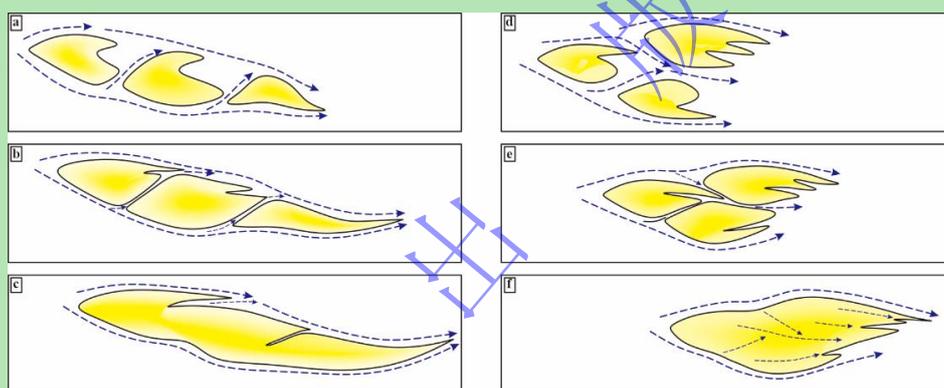


图3 高、低流量砂质辫状河心滩演化模式对比^[26]

(a-c) 低流量砂质辫状河演化模式；(d, f) 高流量砂质辫状河演化模式

Fig.3 Numerical simulation models of high- and low-discharge braided river evolution

(a-c) low discharge; (d, f) high discharge

2.2.3 流量对辫状河演化中心滩的规模的影响

在对照模拟组中发现不同流量模拟辫状河演化过程中心滩的规模存在较明显的差异。结果表明流量越大，则心滩坝越长（图 4a）。

不同于平均坝长，平均坝宽虽然存在演化速率的差异，但最终平均坝宽接近（图 4b）。通过坝长宽比表明，流量越高，则坝长/宽比值增加越快（图 4c）。心滩坝平均面积直接指示了心滩规模（图 4d），随着模拟中流量的增加，心滩坝面积也快速增加，表明心滩坝规模与流量存在明显正相关关系。总的来说，演化过程中流量与砂坝的长度、面积成正比，但与宽度无正相关关系，说明流量越大，流速激增使砂坝更易受到切割，与此同时水流的集中和加速又进一步加快坝之间侧向迁移的速度，从而生成更多的复合坝，在这种“水道切割—

砂坝充填”循环协同演化过程中呈现互相调节的双重效果，使得砂坝总体宽度相对固定，长宽比介于 3.0~4.5。

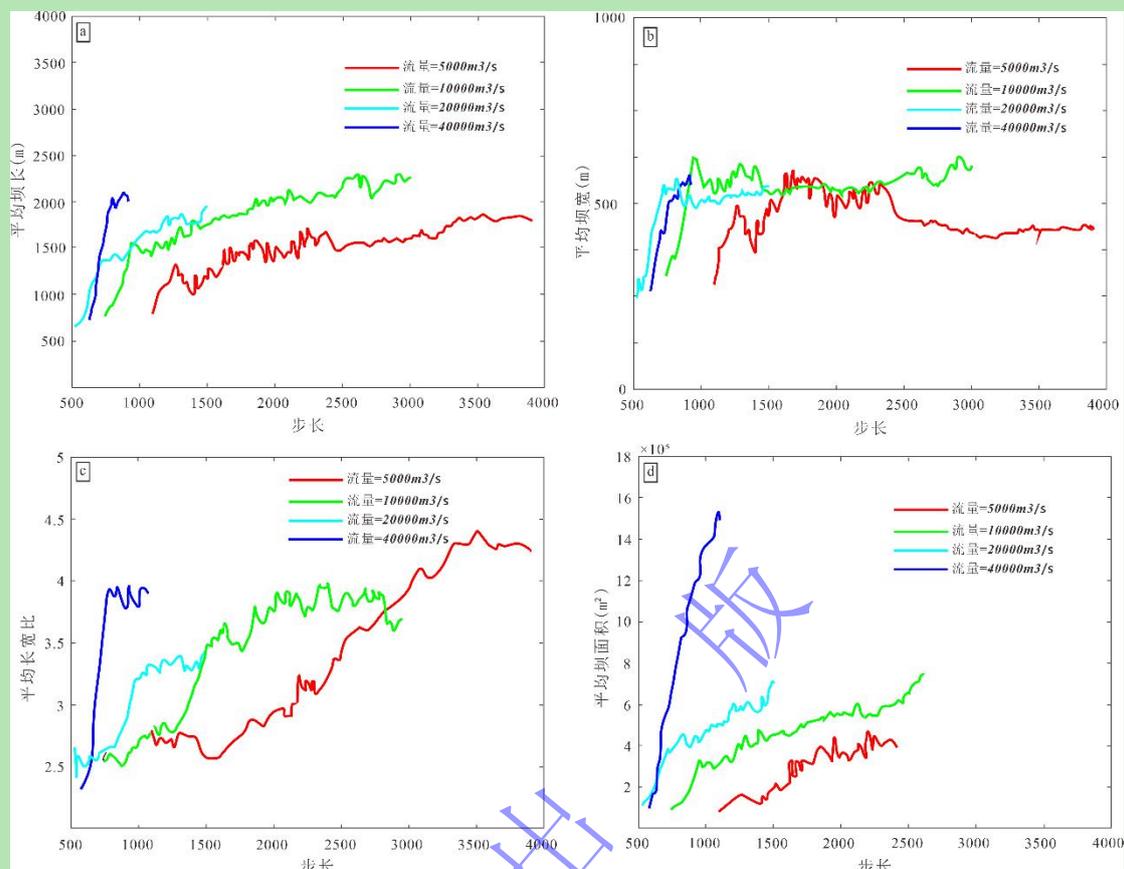


图 4 不同流量下砂质辫状河演化过程中砂坝规模演变趋势

(a) 平均坝长；(b) 平均坝宽；(c) 平均长宽比；(d) 平均面积

Fig.4 Trend of sandbar development during the evolution of sandy braided rivers for simulated average discharge rates and evolution times

(a) average length; (b) average width; (c) average aspect ratio; (d) average area

3 在演化成熟时期不同流量辫状水道和心滩差异

地下储层往往是由辫状河演化自然终止的砂质沉积物组成，其中大部分沉积物已经达到成熟状态。通过不同流量砂质辫状河模拟的成熟阶段河道和心滩沉积特征差异化研究，对指导地下的储层地质学有理论意义。

3.1 流量对辫状水道的形态和规模影响

3.1.1 流量对辫状水道的形态的影响

辫状河流量不仅影响了辫状水道的平面样式、结构特征，更直接控制了辫状水道的宽深。剖面河床形态对比发现，低流量辫状河的辫状水道形态通常为 U 形、V 形（图 5a），随着流量增加，流速激增，水流集中和加速使更大型的宽阔、平坦的水道逐步发育（图 5e）；从平面上看，流量越大，辫状水道形态越顺直，辫状水道数量越少、密度越小，但其宽度也

越大。低流量辫状河以窄而多的交织河网为主，高流量的辫状河以宽而数量有限的骨干辫状水道网络为主（图 2，7）。

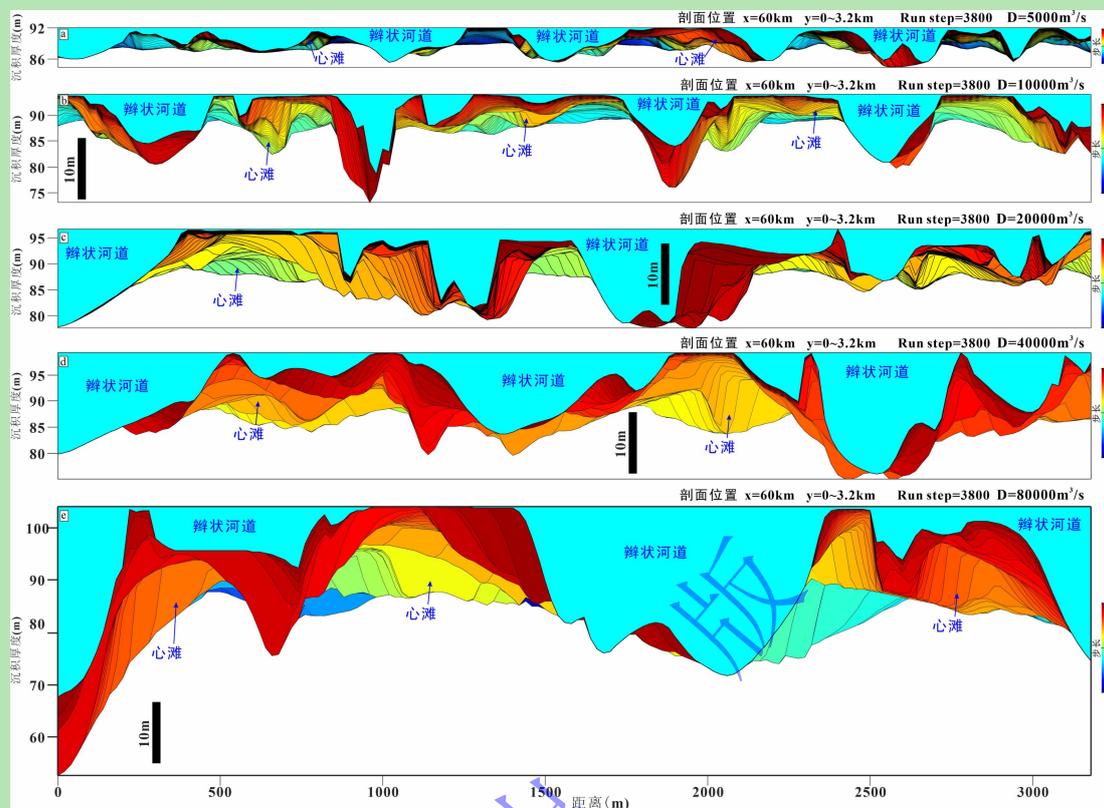


图 5 不同流量条件对照模拟组辫状河剖面

(a) 5 000 m³/s; (b) 10 000 m³/s (c) 20 000 m³/s; (d) 40 000 m³/s; (e) 80 000 m³/s

Fig.5 Simulated profiles of sandy braided rivers at different discharge rates

3.1.2 流量对辫状水道的数量与水深的影响

以水流量为 5 000 m³/s 辫状河为例，切物源方向剖面上平均存在 7.5 条辫状水道，单个辫状水道宽度 20~50 m，弯曲度可达 1.3，辫状水道分岔系数在 2 左右；随着流量增大，辫状水道数量逐步降低至 3 条，宽度增大为 200~600 m，弯曲度减小至 1.1 左右，分岔系数降为 1.2 左右。通过统计模拟每个网格水深数据，分析不同流量演化成成熟阶段辫状河所有网格水深占比发现，随着流量增加，河道水深分布由单峰偏态逐步转变为双峰弱偏态（图 6），显示流量越大，水道间流速的差异越大，水流多集中于宽阔、对称的辫状水道内。说明更大的水流量代表更强的水动力条件，直接控制辫状河水深，导致辫状水道深度也与水流量呈现正相关关系。

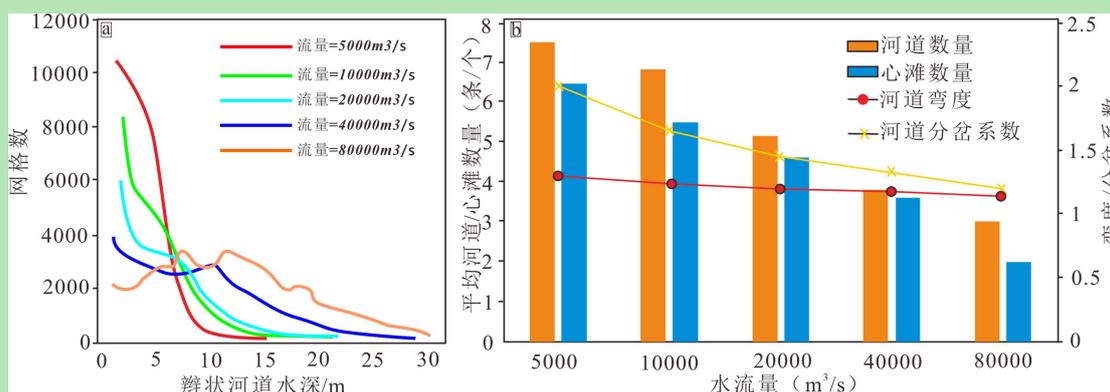


图6 不同流量成熟时期辫状水道分析图

(a) 沉积水深; (b) 辫状水道数量、弯度及分岔系数

Fig.6 Analysis diagrams for different discharge simulated maturity stages of sandy braided river

(a) sedimentary water depth; (b) number, curvature and bifurcation coefficient of braided channels

3.2 流量对心滩形态样式、规模的影响

3.2.1 流量对心滩的类型的影响

流量的差异不仅主导了辫状水道规模、样式、结构等特征,同时也塑造了不同样式、规模的心滩。在演化成熟阶段存在四种类型的砂坝:单元坝、复合坝、复合改造坝、河心滩^[28-31]。其中低流量辫状河以规模较小的复合坝为沉积主体(图8a),可见河边滩和单元坝;随着流量增加,出现大型的复合改造坝(图8b),但此时规模较小的复合坝仍为主体。当流量为20000 m³/s,辫状河内部坝侧向迁移横向“碰撞”变得更加连片,复合改造坝更宽、规模更大(图8c);当流量为40000 m³/s时受水流改造,复合改造坝多为长条形(图8d);当流量为80000 m³/s,流速激增,大部分坝被改造,水道更宽、连通(图8d)。

研究表明,砂坝所处的位置不同,水流样式不同,其中单元坝、复合坝位于河床中部,两侧被不均衡的辫状水道环绕;而河边滩则位于河道边部,一侧与河岸相接,另一侧受辫状水道控制,值得注意的是,辫状河的河边滩与曲流河的边滩存在差异性。辫状河的河边滩与曲流河的边滩位置相似,但沉积演化过程存在明显差异,使得内部结构也存在不同。辫状河的河边滩沉积演化早期受双侧水流影响仍显示为辫状河砂坝特征,在演化中后期先侧向迁移形成长条形砂坝,砂坝阻碍水流使得双侧水流转变为单侧水流,之后砂坝向下迁移形成河边滩,因此自下而上发育侧积体、垂向加积体或向心充填的河道沉积构成,内部夹层不连续不稳定。而曲流河边滩始终受到单侧水流影响,发育侧积体,内部夹层稳定,相对连续^[32]。

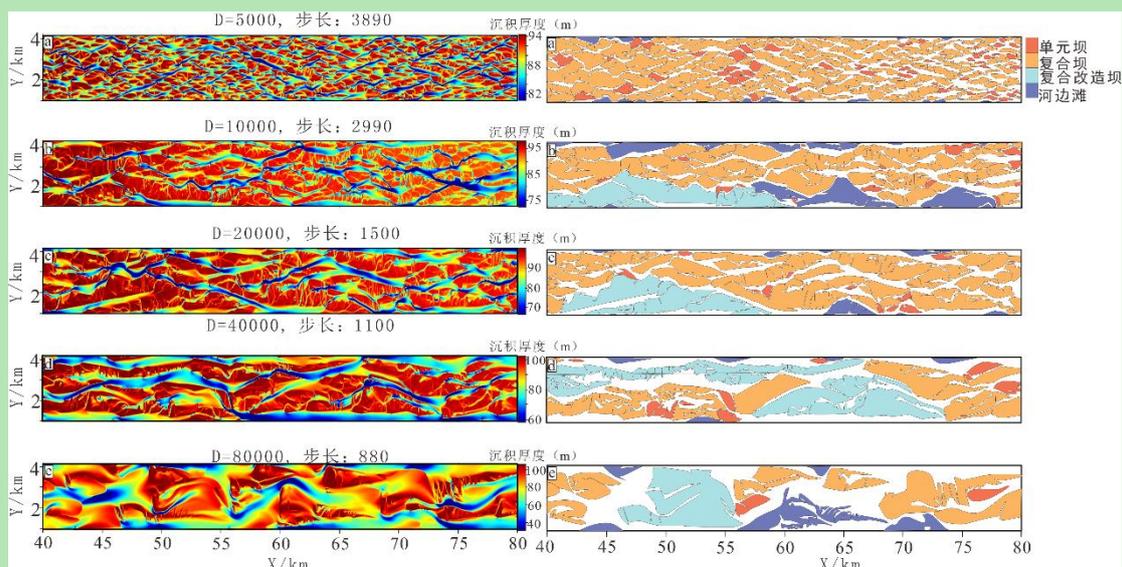


图7 不同水力强度下模拟砂质辫状河演化成熟时期沉积地貌图

(a, a') 5 000 m³/s; (b) 10 000 m³/s; (c) 20 000 m³/s; (d) 40 000 m³/s; (e) 80 000 m³/s

Fig.7 Simulated depositional geomorphology at maturity stages of different discharge sand braided rivers for different flows

3.2.2 流量对心滩形态样式的影响

流量对心滩形态样式有至关重要的作用。对照模拟结果显示：在低能辫状河中（图7a），由于辫状水道网络发育程度高、以窄而多的交织河网为整体样式，在其控制下，辫状河演化末期心滩被河道分岔或合并的动态平衡阶段相对不发育，形成的心滩呈现为简单、叶状的单元坝和长条状的复合坝均匀分布特征。随着河流流量增加，心滩两侧辫状水道规模出现明显的主次、强弱差异并导致心滩不对称性增强，河道两侧水流量的差异使得单元坝更多以“横向碰撞”形成复合坝、规模较大的复合改造坝、河边滩，心滩面积逐渐增大，形态样式变得更复杂。

3.2.3 流量对心滩的规模的影响

流量控制着不同类型心滩的规模与定量关系演变。结果表明，流量越大，砂坝经水流改造动力越强，砂坝总面积占比越小（图8a），其中流量越大，复合改造坝占比越多，长宽比越小，复合坝面积占比越少，长宽比减少，河边滩面积占比越少，长宽比增加（图8b）。例如当流量从5 000 m³/s增加到10 000 m³/s时，复合坝长宽比变小、面积占比减少，复合改造坝占比增加，说明随着流量增加，更多单元坝和复合坝组合形成复合改造坝；当流量从40 000 m³/s增加到80 000 m³/s时，复合改造坝长宽比急速减小，单元坝、复合坝长宽比缓慢减小，说明流量增加时，更多的复合改造坝被河道分割，单元坝向下迁移或与其他砂坝组合形成复合坝或河边滩。在演化成熟阶段，单元坝、复合坝长宽比主要分布在3~3.5，复合改造坝、河边滩长宽比变化较大。因此，辫状河流量高低影响了心滩的形态、规模、结构样式等特征，在实际储层解剖研究中应加以区分考虑。

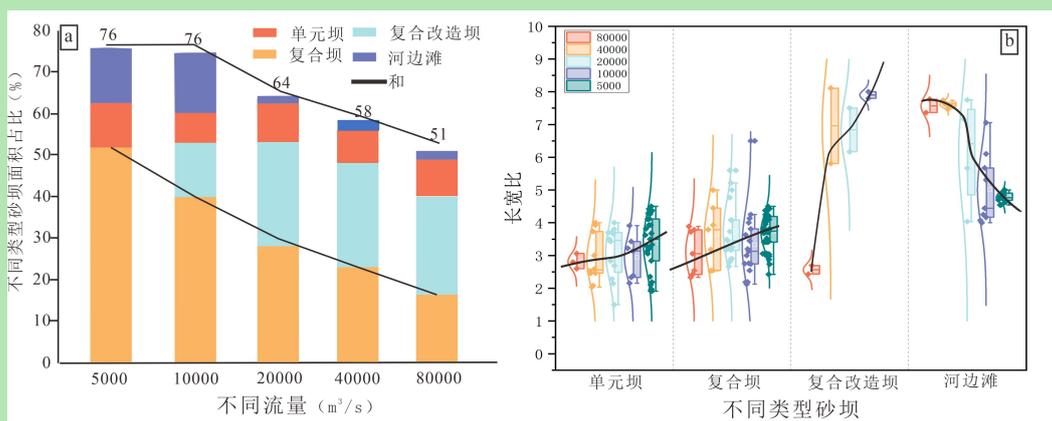


图 8 不同流量成熟时期砂坝参数

(a) 不同类型砂坝面积占比分布图；(b) 不同类型砂坝长宽比分布图

Fig.8 Parameters of sandbars developed at different maturity stages

(a) distribution of area proportion for different types of bars; (b) distribution of aspect ratios for different types of bars

3.3 流量对窄沟形态和规模影响

低流量辫状河心滩内部一般存在 1~3 条小规模窄沟，这些窄沟将心滩“分割”为多个顶部分割、底部相连的次级心滩；随着流量增大，辫状河心滩内部窄沟的发育程度逐渐增大，包括窄沟数量、规模、深度均逐步增大。窄沟作为辫状水道侧缘附属的水流分散通道，在辫状河沉积过程中扮演了重要的角色：窄沟冲刷心滩表面，引起心滩顶部沉积物充分分布，形成复杂的窄沟网络（图 9）。在心滩内部，窄沟发育程度越高，则其顶部沉积构型越复杂，在油气资源开发中会形成上下部流场差异。

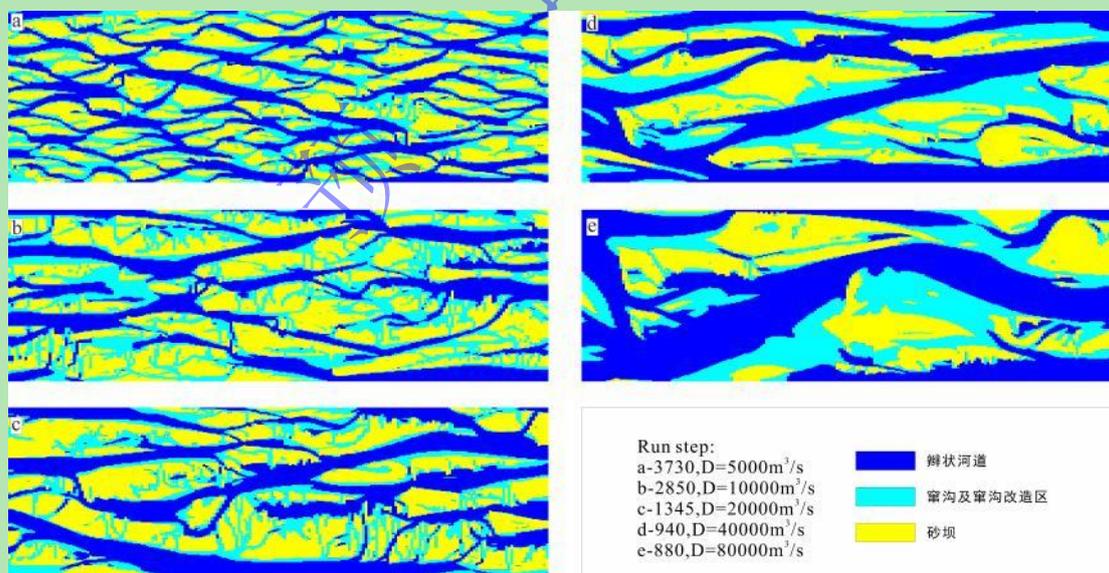


图 9 不同流量下模拟砂质辫状河演化成熟阶段沉积微相分布图

(a) 5 000m³/s；(b) 10 000m³/s；(c) 20 000m³/s；(d) 40 000m³/s；(e) 80 000m³/s

Fig.9 Distribution of sedimentary microfacies at mature stages for simulated sandy braided rivers in different flows

4 流量对心滩内部结构影响

演化成熟后心滩经历了较为复杂的沉积演化过程，从而形成了复杂的内部构型。分别对总流量为 5 000 m³/s 的低流量辫状河和总流量为 40 000 m³/s 的高流量辫状河单元坝、复合坝进行解剖，探究高、低流量辫状河下单元坝和复合坝内部多期次增生体的类型、规模、倾角的差异性，获取内部的结构信息，再现了高低流量辫状河内部单元坝和复合坝的叠置样式和构型特征，为指导地下油气精细开发有着重要的实际意义。

4.1 不同流量演化成熟单元坝内部结构对比

通过对比发现，演化成熟的单元坝垂向自下而上均发育顺流加积体、侧积体、垂向加积体，但低流量辫状河内部单元坝更简单，不发育窜沟，顺流加积体为沉积主体，这与前人提出心滩底部发育大型向下游迁移的顺流加积底型的认识一致^[33-38]。而高流量辫状河内单元坝更复杂、尾部多分支，发育 1~3 个充填或半充填的小窜沟，将其分割成多个双向水流的次级砂坝。

4.1.1 低流量单元坝内部构型

低流量辫状河演化成熟阶段，平面上单元坝规模小，呈长条状、尾部拉长，不发育窜沟。剖面上不同的颜色代表不同时期形成的增生体，单元坝发育五期增生体，自下而上发育顺流加积体、侧积体、垂向加积体，以顺流加积体为主。早期生成的顺流加积体位于单元坝的底部（图 10AA'①~③号），是沉积的主体。侧积体主要位于单元坝两侧，倾角大（平均 2.8°），顺物源方向可观察到沉积后期形成的增生体向下游方向迁移的过程（图 11BB'中④~⑤号），侧积体往往发育在单元坝的尾部和两侧；垂向加积体往往位于单元坝切物源方向的顶部，占比较少。

南萨斯喀彻温砂质辫状河单元坝规模小，最小宽约 100 m，最大长度 300 m，厚 1.5~3 m，以向下迁移为主。通过现代沉积和探地雷达对比认为单元坝底部以板状或槽状交错层理的顺流加积体为主体，被形象地称为“沙核”^[28]，迎水面顶部发育较少的高角度倾斜的沉积物，沉积模拟图 10BB'③号增生体特征符合这一特征。

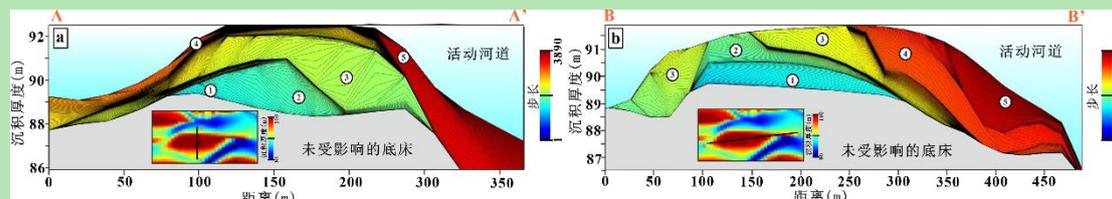


图 10 低流量辫状河演化成熟阶段单元坝内部构型

(a) 切物源方向剖面；(b) 顺物源方向剖面

Fig.10 Sedimentary architecture of a unit bar developed with low discharge braided river

(a) transverse section; (b) longitudinal section

4.1.2 高流量单元坝内部构型

高流量辫状河演化成熟阶段，平面上单元坝呈叶状、尾部多分支，发育 1 条窄沟。剖面上单元坝发育九期增生体，自下而上发育顺流加积体、侧积体、垂向加积体。通过统计顺流加积体倾角可知水流方向是从单元坝的两侧向中心迁移，迁移的过程中倾角越来越陡，范围在 $0.7^{\circ}\sim 4.6^{\circ}$ 之间。侧积体具有下切特点，倾角大（平均 4.5° ），往往发育在单元坝的头尾和水浅一侧（图 11 中 C），方向以上游向下游、水浅一侧（图 11 中 C）向水深一侧（图 11 中 C'）为主。窄沟为典型的向心充填，倾角逐渐减小，呈自上游向下游的倾斜方向。垂向加积体往往是沉积后期以较小的倾角覆盖在单元坝的顶部。前人通过现代沉积、探槽、探地雷达等方式对 Jamuna 河典型砂质辫状河心滩进行解剖，认为在心滩坝底部发育大型平缓顺流加积底型，横向多期增生体加积的沉积模式^[34-35]，该观点与本文中心滩垂向自下而上发育顺流加积体、侧积体、垂向加积体一致。不同点在于，受窄沟的影响，窄沟内部发育侧积体，使得心滩在水平方向是顺流加积体到侧积体重复出现，与刘警阳等^[17]提出高流量游荡型辫状河受洪水影响心滩易冲裂，发育窄沟的认识一致。

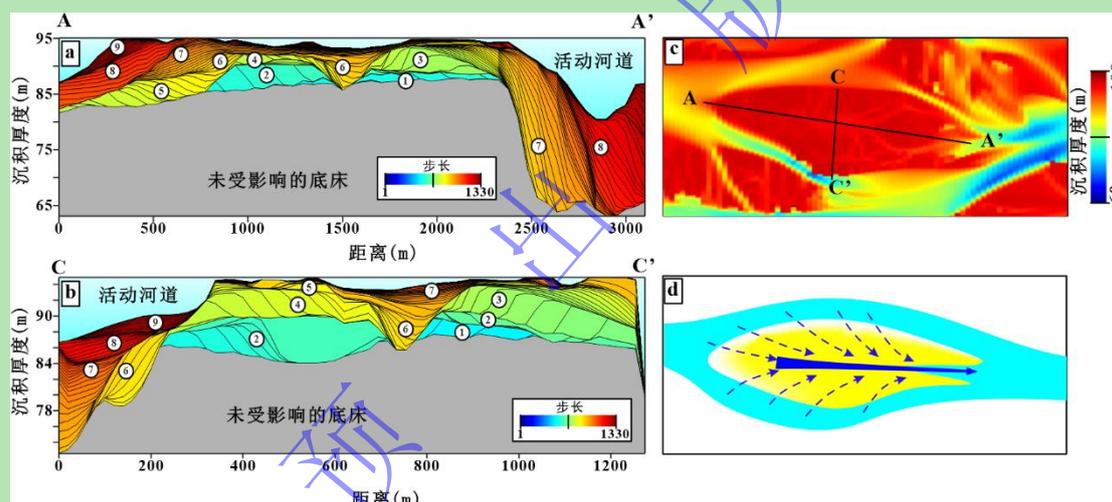


图 11 高流量辫状河演化成熟阶段单元坝内部构型

(a) 顺物源方向剖面 AA'；(b) 顺物源方向剖面 CC'；(c) 平面分布图；(d) 水流模式；①~⑨不同期次增生体

Fig.11 Sedimentary architecture of a unit bar developed with high discharge braided river

(a) longitudinal section AA'; (b) longitudinal section CC'; (c) plan view of the sandbar; (d) water flow mode

4.2 不同流量演化成熟复合坝内部结构对比

对比发现高流量辫状河复合坝比低流量辫状河复合坝叠切关系更复杂、窄沟更发育。

4.2.1 低流量复合坝内部构型

低流量辫状河复合坝呈尾部多分支的不对称叶状，发育 3 条窄沟。剖面上单元坝发育五期增生体，自下而上发育顺流加积体、侧积体、垂向加积体，以顺流加积体为主，顺物源方向可观察到沉积早期形成的①~③期顺流加积体向下游方向迁移的过程(图 12c 中 400~700 m 处)。④~⑤号增生体为侧积体，河道下切作用不明显，倾角小（平均 2.8° ）往往发育在单

元坝的四周和顶部窜沟内；垂向加积体往往位于单元坝切物源方向的顶部，占比较少。

南萨斯喀彻温砂质辫状河复合坝长约 800 m，宽度约 400 m。底部 2.5~3 m 深可见明显侵蚀面的不连续板状或槽状交错层理的顺流加积体（占比 63%）^[28]，在砂坝顶部 0.5 m 内低角度反射的增生体占比高达 84%，这与沉积模拟中底部发育顺流加积体、顶部发育低角度加积体一致。除此之外复合坝相之间存在明显的空间变异性，在背水面靠近深泓线部位（类似图 12d 中 C' 位置），存在大角度倾斜沉积体，在沉积模拟中也可观察到相同位置出现高角度侧积体。

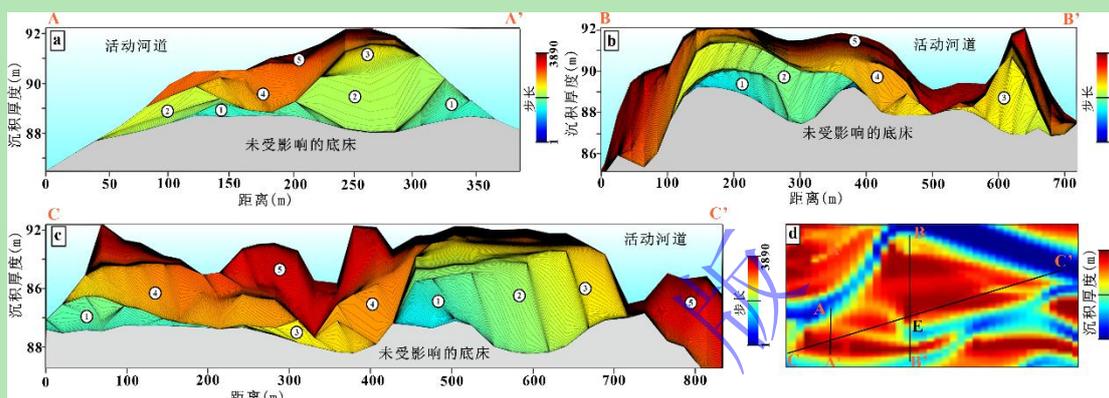


图 12 低流量辫状河演化成熟阶段复合坝内部构型

(a, b) 切物源方向剖面 AA'、BB'；(c) 顺物源方向剖面 CC'；(d) 平面分布图；①~⑤不同期次增生体

Fig.12 Sedimentary architecture of a compound bar developed with low discharge braided river

(a) transverse section AA'; (b) transverse section BB'; (c) longitudinal section CC'; (d) plan view of the sandbar; ①~⑤ represents different stages of accretions

4.2.2 高流量复合坝内部构型

高流量辫状河复合坝呈尾部多分支的不对称椭圆状，窜沟发育程度高。单元坝发育十期增生体，在中部切物源剖面上底部存在大规模的顺流加积体，向上逐渐变为薄层侧积体或“向心充填”河道沉积组合（图 13b 中④号），说明侧积体往往为沉积晚期发育在单元坝的头尾、水浅一侧（图 13e 中 C'）及窜沟内。因此，高流量复合坝自下而上发育顺流加积体、侧积体或河道充填、垂向加积体或窜沟。对比 Jamuna 河典型砂质辫状河解剖结果，除了具备单元坝的特点以外，在坝头、尾和水浅一侧发育小型垂厚 2 m 的多组槽状交错反射雷达相特征^[34]，向坝中心倾角逐渐减小，这与我们统计复合坝的侧积体中位数 3 m 规模相近（图 14b）。

通过对比发现，无论是倾角、高度、长、宽等规模参数，高流量辫状河单元坝、复合坝的规模参数均明显大于低流量辫状河的单元坝、复合坝（图 14），其中增生体倾角、高、长、宽等规模参数呈明显相关关系，低流量增生体长宽比、宽厚比中位数分别为 5 和 18.7，高流量增生体长宽比、宽厚比中位数分别为 3 和 13.6，说明流量与增生体规模呈正相关，但长宽比和宽厚比与流量呈反相关，这与 Li et al.^[39]提出的坝高、坝面积与流量呈正相关一致。

除此之外，同一个砂坝内侧积体、顺流加积体、垂向加积体倾角逐渐减小，高度依次降低。从规模上看，同一个砂坝内顺流加积体和垂向加积体的长度和宽度明显高于侧积体。因此，侧积体位于心滩两侧，具备高倾角、较厚和小规模的特点，垂向加积体位于心滩顶部，具备较长的延伸范围、薄厚度、小倾角的特点。值得注意的是，受水流强弱的影响，内部增生体倾角是变化的，尤其是顺流加积、侧积体倾角离散程度高，分布散，这使得地下解剖难度增大。

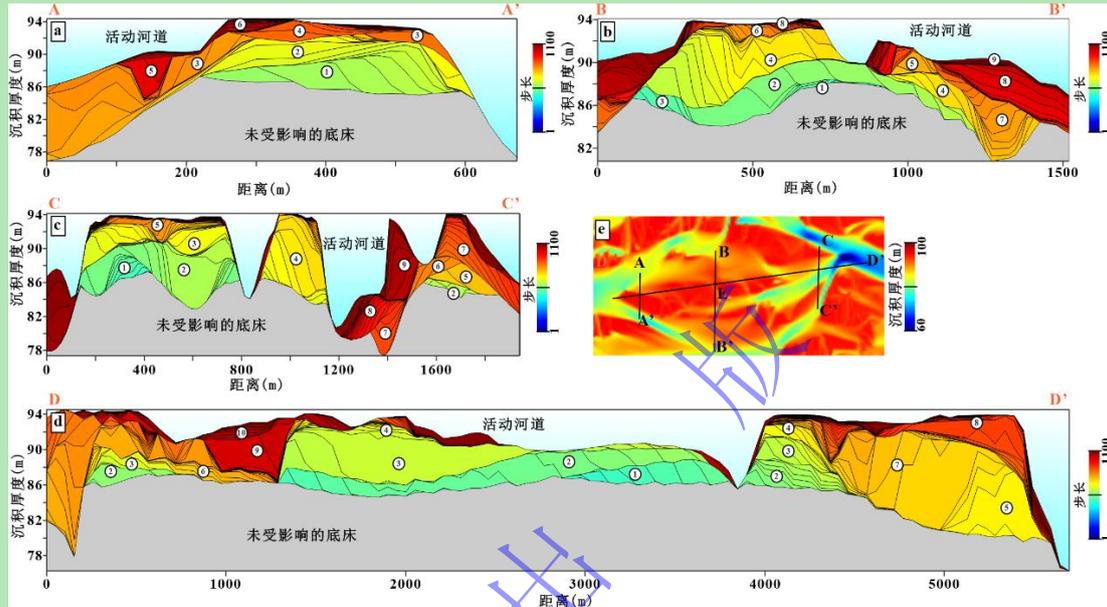


图 13 高流量辫状河演化成熟阶段复合坝内部构型

(a~c) 切物源方向剖面 AA'、BB'、CC'；(d) 顺物源方向剖面 DD'；(e) 为平面分布图；①~⑩不同期次增生体

Fig.13 Sedimentary architecture of a compound bar developed with high discharge braided river

(a) transverse section AA'; (b) transverse section BB'; (c) transverse section CC'; (d) longitudinal section DD'; (e) plan view of the sandbar; ①-⑩ represents different stages of accretions

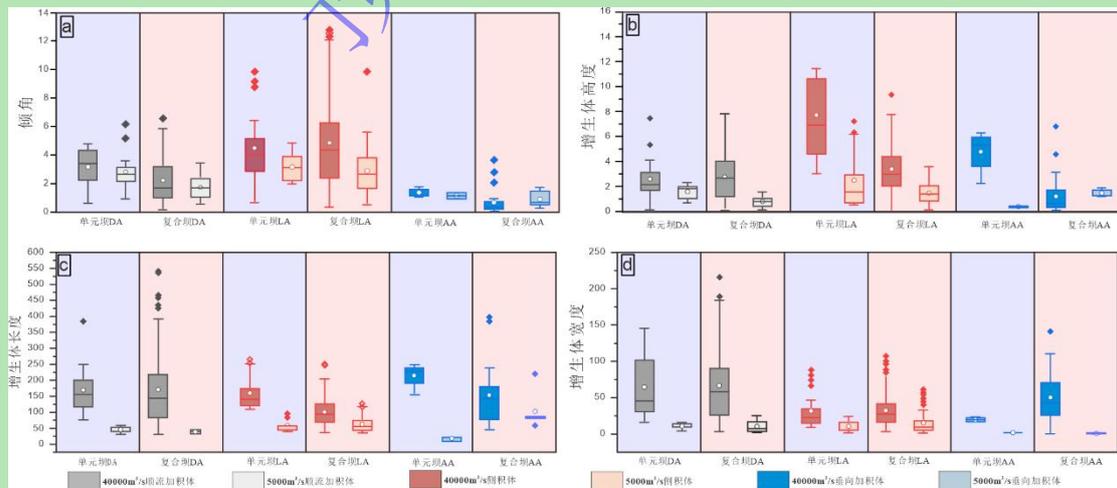


图 14 高、低流量辫状河单元坝、复合坝内部构型规模参数对比

(a) 倾角；(b) 高度；(c) 长度；(d) 宽度

Fig.14 Comparison of scale of unit bar and compound bar in high- and low-discharge braided river

(a) dip angle; (b) length; (c) width; (d) thickness

5 讨论

5.1 野外实际案例与沉积模拟结果对比

通过对比野外露头解剖结果，验证模拟结果的可靠性。大同云冈组石窟段为典型的砂质辫状河沉积，图 15C2 剖面发育两期心滩，认为单期心滩的厚度介于 1.5~7.5 m，宽 50~200 m，底部发育大型顺流加积底型，顶部偶见小规模窜沟，心滩内可见 1~3 cm 间歇性薄落淤层^[40]，这与高流量砂质辫状河内单元坝的内部结构相似。值得注意的是在不同的位置，落淤层的倾角是变化的，例如 2 号和 4 号增生体之间发育落淤层倾角近水平（图 15b 中 C 侧），但在 1、2、3 增生体之间落淤层倾角倾斜（图 15b 中 C' 侧）。

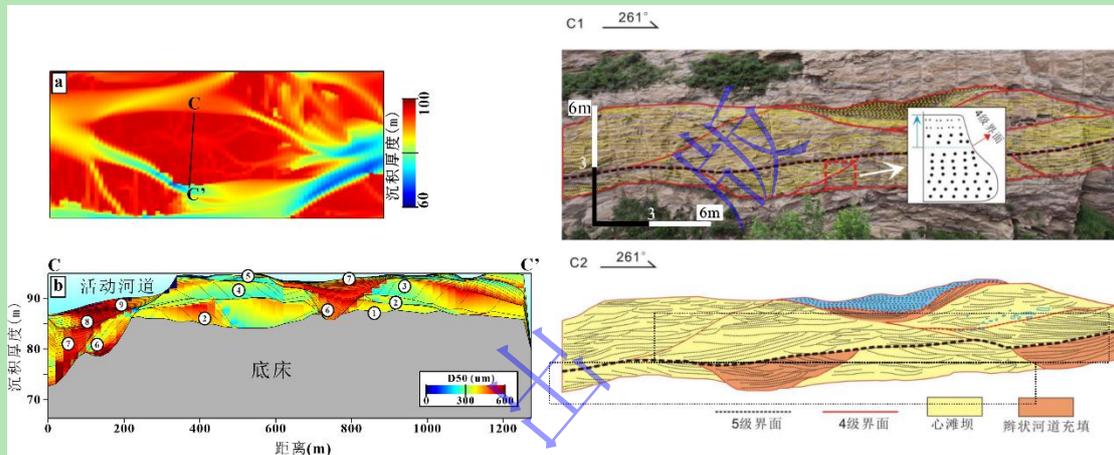


图 15 高流量辫状河单元坝与野外露头内部构型对比

(a) 高流量辫状河单元坝平面图；(b) 切物源剖面 CC'；C1, C2 为野外露头解剖图

Fig.15 Comparison between architecture of high-discharge braided river sandbar and rock outcrop

(a) plan view of sandbar; (b) transverse section CC'; C1, C2 are outcrop anatomy

5.2 井下实际案例与沉积模拟结果对比

在沉积模拟中提取粒度 D50 剖面数据和心滩不同位置处 D50 数据（图 16），与单井实际案例分析对比，验证模拟结果的可靠性。心滩的储层非均质性与不同类型增生体的叠置样式有关，进一步明确心滩是以复合反韵律为主，头部发育多套反韵律顺流加积体，心滩中部发育窜沟，偶见正韵律侧积体，内部增生体界面处易发育细粒薄夹层的落淤层。

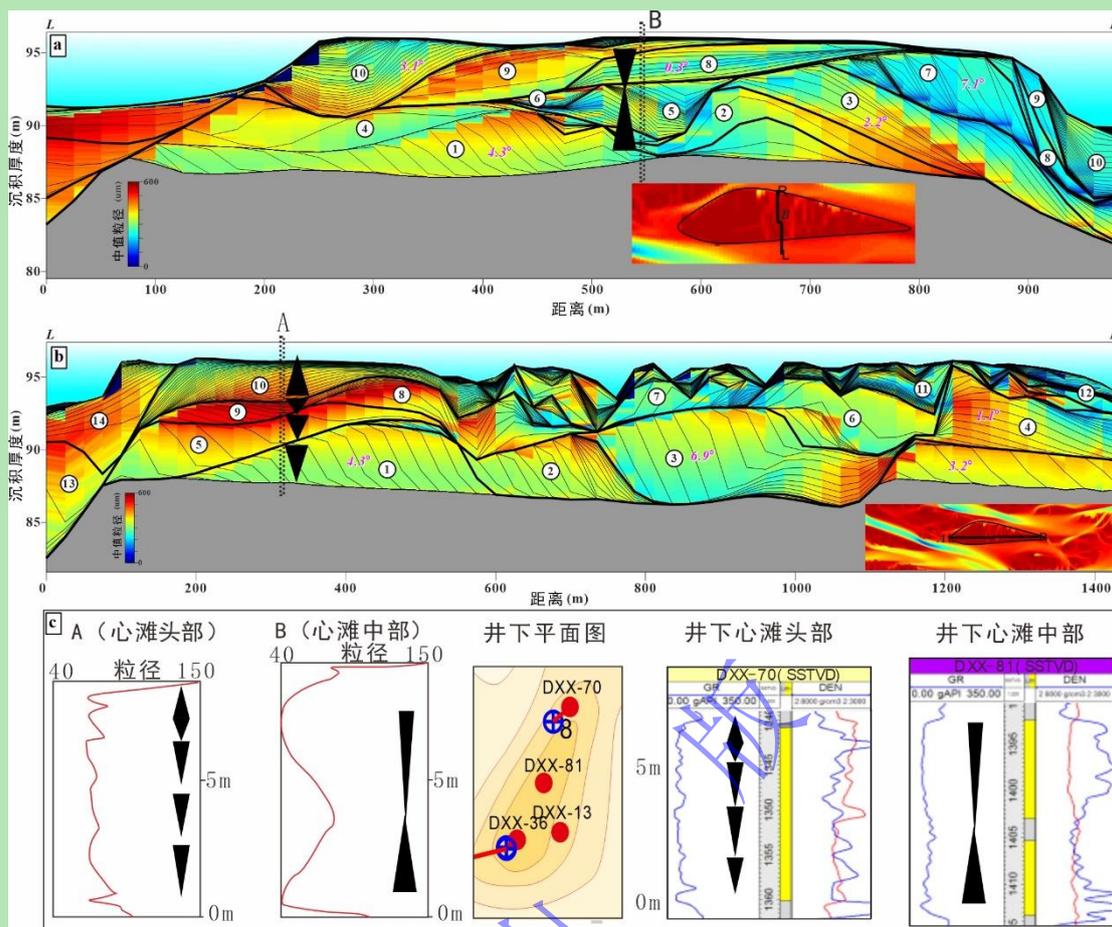


图 16 高流量辫状河单元坝与井下实钻案例内部构型对比

(a, b) 辫状河单元坝顺物源和切物源剖面图；(c) 不同位置与井下对比

Fig.16 Comparison between architecture of high-discharge braided river sandbar and drill core data

(a) transverse section; (b) longitudinal source profile; (c) underground wells at different locations

真实的辫状河发育过程受自然界复杂因素的影响，包括沉积物粒度分选性（如物源供给差异）、古地形坡度及流量变化（洪峰或季节性河流）等多因素耦合影响，分析表明流量变化对砂质辫状河的形态、规模及内部结构呈主导作用，为建立明晰的流量和辫状河规模半定量一定量相关关系，文章重点讨论以流量为单一变量下的辫状河定量解析，关于其他边界条件例如粒度、坡度的影响，将在后续研究中进行系统性探讨。

6 结论

(1) 流量与辫状河的沉积演化速率成正比。低流量辫状河演化程度低，砂坝以向下迁移为主，不易被河道分割或再次合并；而高流量辫状河演化程度高，砂坝以侧向迁移为主，心滩合并、被分割的动态平衡过程较普遍。

(2) 流量影响辫状水道平面样式、水深，并进一步影响辫状水道和心滩的协同演化过程。流量越大，河道越宽、直、深，分岔少，演化成熟阶段辫状水道网络更复杂；流量越

大,心滩样式更复杂,出现规模较大的复合改造坝和河边滩。由于流量增加,心滩经水流改造动力越强,其内部叠切关系更复杂,更易发育窄沟。除此之外,流量越大的辫状河,在演化成熟阶段复合改造坝占比增加,复合坝、河边滩面积占比减少。

(3) 砂质辫状河心滩内部结构具有很强的空间变异性。相同点在于自下而上均发育顺流加积体、侧积体、垂向加积体,不同点在于流量越大,心滩内部侧积体占比增加。其中顺流加积体(DA)作为沉积主体单元,侧积体位于两侧或窄沟内,具备“短轴、厚层(3~8 m)、高倾角($>4^\circ$)”的特点,垂向加积体位于心滩顶部,具备“长轴、薄层、低倾角($<1^\circ$)”的特点。

(4) 流量与增生体规模呈正相关,但与长宽比、宽厚比呈反相关。流量越大,心滩内部增生体的倾角、高度、长、宽等参数越大,但宽度增长有限,其中低流量辫状河心滩长宽比中位数为3.5,高流量辫状河心滩长宽比中位数为4.5。

参考文献(References)

- [1] Rust B R. A classification of alluvial channel systems[M]//In: Miall A D. *Fluvial Sedimentology-Memoir of the Canadian Society of Petroleum Geologists*. 1977, 5:187-198.
- [2] Ashworth P J, Best J L, Roden J E, et al. Morphological evolution and dynamics of a large, sand braid-bar, Jamuna River, Bangladesh[J]. *Sedimentology*, 2000, 47(3): 533-555.
- [3] Ashworth P J, Sambrook Smith G H, Best J L, et al. Evolution and sedimentology of a channel fill in the sandy braided South Saskatchewan River and its comparison to the deposits of an adjacent compound bar[J]. *Sedimentology*, 2011, 58(7): 1860-1883.
- [4] 于兴河. 辫状河储层地质模式及层次界面分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004. [Yu, Xinhe. *Braided river reservoir geological model and hierarchical interface analysis*. [M]. Beijing: Petroleum Industry Press.
- [5] 张昌民, 尹太举, 赵磊, 等. 辫状河储层内部建筑结构分析[J]. 地质科技情报, 2013, 32(4): 7-13. [Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhao Lei, et al. *Reservoir architectural analysis of braided channel*[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(4): 7-13.]
- [6] 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.]
- [7] 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.
- [8] Bridge J S, Lunt I A. Depositional models of braided rivers[M]//Sambrook Smith G H, Best J L, Bristow C S, et al. *Braided Rivers: Process, Deposits, Ecology and Management*. Oxford, UK: International Association of Sedimentologists Special Publication, Blackwell, 2006:11-50.
- [9] Miall A D. Facies models[M]//Miall A D. *Stratigraphy: A Modern Synthesis*. Cham: Springer, 2022: 175-230.
- [10] Schuurman F, Marra W A, Kleinans 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.
- [11] Tamminga A D, Eaton B C, Hugenholtz C H. UAS-based remote sensing of fluvial change following an extreme flood event[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(11): 1464-1476.

- [12] Ethridge F G. Interpretation of ancient fluvial channel deposits: Review and recommendations[M]//Davidson S K, Leleu S, North C P. From River to Rock Record: The Preservation of Fluvial Sediments and Their Subsequent Interpretation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication., 2011,97:(9-35).
- [13] 贾爱林, 王国亭, 孟德伟, 等. 大型低渗-致密气田井网加密提高采收率对策: 以鄂尔多斯盆地苏里格气田为例[J]. 石油学报, 2018, 39 (7): 802-813. [Jia Ailin, Wang Guoting, Meng Dewei, et al. Well pattern infilling strategy to enhance oil recovery of giant low-permeability tight gasfield: A case study of Sulige gasfield, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(7): 802-813.]
- [14] 陈东阳, 王峰, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地东部府谷天生桥剖面上古生界下石盒子组 8 段辫状河储层构型表征[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(2): 335-345. [Chen Dongyang, Wang Feng, Chen Hongde, et al. Characterization of braided river reservoir architecture of the Upper Paleozoic He 8 member on Fugu Tianshengqiao outcrop, eastern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2): 335-345.]
- [15] 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.
- [16] Fielding C R, Alexander J, Argiro A. Towards a new generation of fluvial facies models for the interpretation of ancient deposits, based on inter-annual peak discharge variance of modern rivers[J]. Sedimentology, 2025, 72(1): 275-329.
- [17] 刘警阳, 李伟, 赵文智, 等. 流量变化控制的辫状河心滩演化过程[J]. 地球科学, 2024, 49 (10): 3516-3528. [Liu Jingyang, Li Wei, Zhao Wenzhi, et al. Evolution of bars in braided rivers controlled by discharge variability[J]. Earth Science, 2024, 49(10): 3516-3528.]
- [18] 李伟, 岳大力, 王武荣, 等. 辫状河沉积构型研究进展: 沉积演化与构型特征[J]. 古地理学报, 2023, 25 (5): 1032-1048. [Li Wei, Yue Dali, Wang Wurong, et al. Depositional models of braided rivers: Characteristics of sedimentary evolution and architecture[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(5): 1032-1048.]
- [19] Nicholas A P. Modelling the continuum of river channel patterns[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(10): 1187-1196.
- [20] Straub K M, Ganti V, Paola C, et al. Prevalence of exponential bed thickness distributions in the stratigraphic record: Experiments and theory[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2012, 117(F2): F02003.
- [21] Van De Lageweg W I, Van Dijk W M, Kleinhans M G. Morphological and stratigraphical signature of floods in a braided gravel-bed river revealed from flume experiments[J]. Journal of Sedimentary Research, 2013, 83(11): 1033-1046.
- [22] Feng W J, Fei-Xiang G, Zhang C M, et al. Sedimentary architecture of a sandy braided river: Insights from a flume experiment[J]. Petroleum Science, 2025, 22(1): 16-28.
- [23] 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.
- [24] Rice S P, Church M, Wooldridge C L, et al. Morphology and evolution of bars in a wandering gravel-bed river; Lower Fraser river, British Columbia, Canada[J]. Sedimentology, 2009, 56(3): 709-736.
- [25] Schuurman F, Kleinhans M G, Middelkoop H. Network response to disturbances in large sand-bed braided rivers[J]. Earth Surface Dynamics, 2016, 4(1): 25-45.
- [26] Guo Y, Li S H, He F Q, et al. Sedimentary characteristics and internal architecture of a sandy braided river: Insights from a numerical model[J]. Water, 2023, 15(23): 4119.
- [27] 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. [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 & Natural Gas Geology, 2023, 44(6): 1595-1608.]
- [28] Sambrook Smith G H, Ashworth P J, Best J L, et al. The sedimentology and alluvial architecture of the sandy braided South Saskatchewan River, Canada[J]. Sedimentology, 2006, 53(2): 413-434.

- [29] Sambrook Smith G H, Ashworth P J, Best J L, et al. The sedimentology and alluvial architecture of a large braid bar, Río Paraná, Argentina[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(8): 629-642.
- [30] Puig J M, Cabello P, Howell J, et al. Three-dimensional characterisation of sedimentary heterogeneity and its impact on subsurface flow behaviour through the braided-to-meandering fluvial deposits of the Castissent Formation (Late Ypresian, Tremp-Graus Basin, Spain)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 103: 661-680.
- [31] 冯文杰, 曹荆楚, 张昌民, 等. 砂质辫状河沉积演化机制与沉积构型模式: 量化水槽沉积模拟实验研究[J/OL]. *沉积学报*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.068>. [Feng Wenjie, Cao Jingchu, Zhang Changmin, et al. Sedimentary evolution mechanisms and architecture models of sandy braided rivers: A study based on Quantitative flume experiments[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.068>.]
- [32] 郭颖, 冯文杰, 李少华, 等. 砂质辫状河中河边滩和河心滩沉积构型: 基于沉积演化过程的精细解析[J]. *地球科学进展*, 2024, 39(4): 405-418. [Guo Ying, Feng Wenjie, Li Shaohua, et al. Sedimentary architecture between compound Middle bars and side bars: Insights from a numerical model of sandy braided rivers[J]. *Advances in Earth Science*, 2024, 39(4): 405-418.]
- [33] 廖保方, 张为民, 李列, 等. 辫状河现代沉积研究与相模式: 中国永定河剖析[J]. *沉积学报*, 1998, 16(1): 34-39, 50. [Liao Baofang, Zhang Weimin, Li Lie, et al. Study on modern deposit of a braided stream and facies Model: Yaking the Yongding River as an example[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 34-39, 50.]
- [34] Best J L, Ashworth P J, Bristow C S, et al. Three-dimensional sedimentary architecture of a large, mid-channel sand braid bar, Jamuna River, Bangladesh[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(4): 516-530.
- [35] 牛博, 高兴军, 赵应成, 等. 古辫状河心滩坝内部构型表征与建模: 以大庆油田萨中密井网区为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(1): 89-100. [Niu Bo, Gao Xingjun, Zhao Yingcheng, et al. Architecture characterization and modeling of channel bar in paleo-braided river: A case study of dense well pattern area of Sazhong in Daqing oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(1): 89-100.]
- [36] 张宪国, 张育衡, 张涛, 等. 基于沉积数值模拟的辫状河心滩演化[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(2): 1-9. [Zhang Xianguo, Zhang Yuheng, Zhang Tao, et al. Analysis of braided bar evolution based on numerical simulation of deposition process[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2020, 44(2): 1-9.]
- [37] 何维领, 李少华, 王濡岳, 等. 砂质辫状河储层构型特征及沉积演化: 以山西大同侏罗系云冈组露头为例[J]. *沉积学报*, 2024, 42(5): 1699-1710. [He Weiling, Li Shaohua, Wang Ruyue, et al. Sandy braided river architecture characteristics and evolution: A case study from outcrops in the Middle Jurassic Yungang Formation, Datong, Shanxi province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(5): 1699-1710.]
- [38] 唐洪, 龙冠宇, 张章, 等. 基于沉积数值模拟的砂质辫状河三角洲沉积特征与演化规律研究[J/OL]. *沉积学报*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.088>. [Tang Hong, Long Guanyu, Zhang Zhang, et al. Sedimentary characteristics and evolution laws of a sandy braided river delta based on sediment numerical simulation[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.088>.]
- [39] Li W, Colombera L, Yue D L, 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.
- [40] 任晓旭. 砂质辫状河构型界面附近岩性和物性分布模式研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020, doi: 10.27643/d.cnki.gsybu.2020.000148. [Ren Xiaoxu. Lithology and physical property distribution patterns of sandy braided river near architectural bounding surfaces[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020, doi: 10.27643/d.cnki.gsybu.2020.000148.]

Sedimentary Evolution and Architecture in Sandy Braided Rivers with Different Discharge Rates: Insights from a Numerical Model

GUO Ying^{1,2}, CHEN Kui², GAO Qingsong², REN Guanglei², LI Shaohua^{1*}, FENG Wenjie¹, LIU Linsong², RAN Hui²

1. School of Geoscience, Yangtze University, Wuhan 434100, China

2. Sinopec North China Petroleum Bureau, Zhengzhou 450006, China

Abstract: [Objective] The discharge rate regulates the sedimentary evolution and morphological scale of a braided river. In this study, the influence of discharge rate on the formation of braided channels, bars and internal sedimentary architecture is systematically analyzed for the first time. [Methods] Five groups of three-dimensional sedimentary numerical simulation experiments with different flow rates were carried out using Delft3D software to explore the evolution, morphological patterns and scale differences of braided channels and bars formed as a result of various flow rates. The models reproduce the internal architectural patterns of a range of bars developed in braided rivers with different flow rates and summarize the sedimentary characteristics and evolution of sandy braided rivers. [Results] (1) The rate of discharge is positively correlated with the sedimentary evolution of braided rivers. Low-discharge braided rivers exhibit limited evolution, in which bars mainly tend to migrate vertically and are less dissected by channels. By contrast, high-discharge braided rivers undergo intensive evolution, characterized by lateral migration and frequent dynamic equilibrium processes involving compound bars and dissection. (2) The discharge rate influences the plane pattern and channel depth of braided channels. As discharge increases, the braided channel becomes wider and deeper, resulting in a reduced overall number of channels but more highly developed chutes of the channel bars. Lower-discharge braided channels are shallower and primarily consist of numerous narrow, relatively fixed interwoven river networks. (3) Discharge further governs the co-evolution of channels and bars. Greater discharge enhances bar complexity, promoting the development of large complex compound bars and side bars with intricate internal stacking relationships and more frequent chutes. (4) Despite strong spatial heterogeneity in the internal architecture of channel bars in sandy braided rivers, consistent patterns emerge: all bars develop downstream accretions (DA) in the core, vertical accretions (VA) layered above, and lateral accretions (LA) deposited at the sides. A key distinction lies in the increased proportion of LA at higher discharge conditions. (5) Discharge correlates positively with accretion size but inversely with aspect ratio and flakiness ratio. Median aspect ratios of bars are 3.5 in low-discharge systems versus 4.5 in high-discharge systems. [Conclusions] The study proposes a positive correlation between discharge and the scale of channel bars and accretions in sandy braided rivers. This clarifies flow-controlled sedimentary characteristics and scale variations, providing a basis for analyzing complex subsurface reservoir architectures.

Key words: Numerical simulation of sedimentation; discharge; braided river; sedimentary evolution; sedimentary architecture