

狭长浅水湖盆分支河流体系演化过程和沉积模式

——基于水槽沉积模拟实验

李赛云¹, 尹太举¹, 张昌民¹, 孙中恒¹, 任大伟², 卫猛¹, 陈旋³

1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东湛江 524057

3. 中国石油吐哈油田分公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009

摘要 【目的】分支河流体系(Distributive Fluvial System, DFS)广泛发育于现代和古代沉积地层中, 是重要的油气储层。在低可容空间且物源供给充足的狭长浅水湖盆内可能发育多个互相影响的DFS, 并演化出轴向河流。这种在狭长浅水湖盆内发育的多个DFS和轴向河流的发育过程、沉积特征、砂体展布规律以及各沉积单元之间的相互影响关系尚不明确。【方法】通过水槽模拟实验再现其沉积过程, 使用高精度的3D扫描仪配合自研程序对沉积区进行三维可视化分析, 明确DFS的阶段性演化特征。【结果】(1)随着DFS规模扩大, DFS表面的水流逐渐聚集, 初始流态为片流, 随后演化为非限制性水流, 最终为限制性水流;(2)随着盆地可容纳空间变小, 盆地内的轴向水流逐渐汇聚成轴向河流, 轴向河流对两侧的DFS产生破坏作用并不断决口, 最终在盆地内轴向河流下游形成大规模的河道沉积;(3)狭长浅水湖盆发育多个DFS时, 沉积砂体主要集中在物源附近的DFS处以及轴向河流下游, 盆地发育时间越久, 河流沉积规模越大。【结论】从盆地尺度刻画了物源供给充足的狭长浅水湖盆沉积发育模式, 明确了DFS和轴向河流砂体展布规律, 为油气勘探和分支河流体系研究提供理论支持。

关键词 分支河流体系; 低可容空间; 水槽模拟实验; 沉积特征; 小尤尔都斯盆地

第一作者简介 李赛云, 男, 1993年出生, 硕士研究生, 沉积学, E-mail: 2463959345@qq.com

通信作者 尹太举, 男, 教授, 沉积学, E-mail: yintaij@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

0 引言

分支河流体系(Distributive Fluvial System, DFS)是由 Weissmann *et al.*^[1]和 Hartley *et al.*^[2]于2010年提出的沉积学术语, 它指河流从一个顶点开始呈放射状展布的沉积体系, 囊括了传统意义的冲积扇、河流扇以及巨型扇等沉积单元。分支河流体系(DFS)概念的提出使得人们能够对沉积盆地内发育的一系列沉积体系进行总体的理解和把握^[3]。陆相盆地中发育的河流沉积绝大多数属于分支河流体系^[4], 地层记录中的分支河流体系也发现了大规模油气、水储层, 我国准噶尔盆地^[5-7]、塔里木盆地^[8-10]、柴达木盆地^[11]、四川盆地^[12-13]、鄂尔多斯盆地^[14-17]、东海盆地^[18]等均发现了大规模的分支河流体系成因的油气藏。但其沉积过程、演化

收稿日期: 2024-08-07; 收修改稿日期: 2024-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130813, 42072119) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42130813, 42072119]

规律及内部构型特征极为复杂^[19], 国内外学者提出了诸多沉积模式。Weissmann *et al.*^[1]提出的分流和汇流盆地河道分布样式是最早的 DFS 沉积模式, 但其仅讨论了河道样式, 未考虑沉积特征和沉积环境。Weissmann *et al.*^[20]提出了类似冲积扇沉积模式的远端、中端、近端不同沉积环境及沉积特征的沉积模式, 不同于传统冲积扇沉积模式, 不再强调泥石流和筛状沉积, 而是将河流沉积作为主体。Hartley *et al.*^[21]提出了更加细化的沉积模式, 在这一模式中刻画了河道形态和砂体的垂向结构, 指出了 DFS 储层的砂体结构、砂地比等规律, 并将这一模式应用于储层非均质性解释。此外, Davidson *et al.*^[22]提出了 3 种典型地貌的 DFS 模式; Owen *et al.*^[23]结合各种地上地下地质信息建立了盐洗段 DFS 沉积模式; 张元福等^[24]对河流扇内部的河道形态以及砂体发育类型进行分类; 李相博等^[25]运用河流扇模式解释了鄂尔多斯盆地延长组“满盆砂”的成因; 吕峻岭等^[9]通过水槽模拟实验总结了干旱型 DFS 的沉积过程, 并提出了 DFS 垂向上的三层结构。前人研究多集中于开阔地形下发育的单个或者多个 DFS 的沉积特征^[4], 没有深入研究横向上受限的狭长盆地内发育的多个互相影响的 DFS 形成的沉积体系, 也未明确盆地内轴向水流的发育过程以及它对单个扇体发育的影响。

在多面环山、多物源背景、排水通畅、构造稳定的低可容空间狭长浅水湖盆中, 盆地演化初期容易发育浅水三角洲, 随着浅水三角洲不断发育, 会逐渐向湖盆中心延伸生长, 直至充满整个湖泊^[25]。前人对此进行了大量研究^[26-30], 并提出了不同沉积条件下的沉积模式^[31-34]。随着充足的物源持续注入低可容空间的狭长浅水湖盆, 各物源处的河流会向湖盆中心延伸, 最终在盆地中形成一条河流。在这一过程中, 三角洲的沉积作用逐渐减弱, 河流沉积作用逐渐占据主导地位, 物源附近的沉积体也不断升高, 最终在物源处形成大型的扇状沉积, 在湖盆中形成大规模的河流扇沉积^[25], 湖盆中的河流也会对早期形成的浅水三角洲有一定破坏作用。这类盆地的沉积特征与传统的三角洲沉积模式有一定差异, 更加符合分支河流体系的沉积模式。

因此, 本文首次将分支河流体系模式应用于多物源浅水湖盆的演化过程, 通过水槽模拟实验, 使用高精度 3D 激光扫描仪对每一期沉积体进行扫描制成三维模型, 再现浅水狭长湖盆中发育 DFS 和沉积区水流的演化过程^[35], 分析其影响因素, 力求为资源勘探以及 DFS 理论研究提供指导。

1 实验方案

1.1 实验装置

本次模拟实验在 CNPC 长江大学沉积水槽模拟实验室(武汉)完成。实验设计了物源供

应系统、沉积区、观测系统、水位调节系统。物源供应系统由水泵、带阀门的水管、自来水、储水箱、水位控制器、带排水阀的蓄水池、供砂器构成，实验前使用自来水灌满储水箱后打开供砂器电源和供砂器下方的水管阀门即可向沉积区输送水和沉积物，调节供砂器开度可以控制出砂量，水进入蓄水池沉淀后使用泵抽进储水箱循环利用；观测系统由监控摄像头、无人机、照相机、3D 激光扫描仪组成，监控摄像头主要作用为保护实验设施以及记录各个实验操作的时间节点，无人机和照相机的作用为拍摄沉积体照片、3D 激光扫描仪作用为扫描每个期次的沉积高程数据；水位调节系统由水位挡板和水位标尺组成，可以根据设计水深调节挡板高度，控制沉积区水位。沉积区是使用混合砂铺成的底形，实验前对底形进行适当按压加固（图 1）。

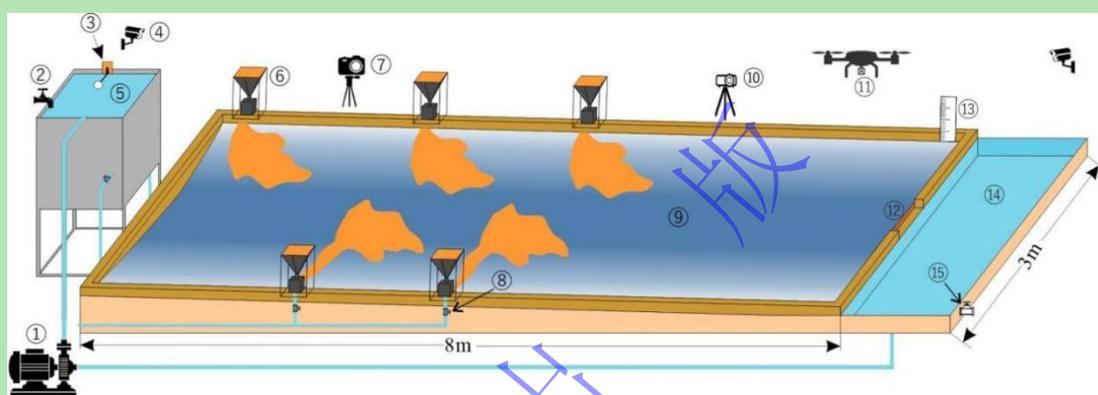


图 1 实验装置示意图

①水泵；②自来水；③水位控制器；④监控摄像头；⑤储水箱；⑥供砂器；⑦照相机；⑧物源水流阀门；⑨沉积区；⑩3D 激光扫描仪；⑪无人机；⑫水位控制挡板；⑬水位标尺；⑭蓄水池；⑮蓄水池阀门

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup

1.2 实验条件设置

依据自然条件下的狭长浅水湖盆特征，实验设置了长约 8 m、宽约 3 m、轴向坡降 1.5% 的沉积区域。沉积区出水口水深 10 cm，实验过程中保持水位不变。沉积区边缘高于中心 20 cm，北侧斜坡区长 40 cm，南侧斜坡区长 15 cm（图 2）。实验采用干砂，干砂中值粒径为 0.35 mm。

本次实验共设置 5 处物源，模拟对象为自然条件下狭长湖盆中发育的多个 DFS 组成的沉积系统，不考虑气候因素，整个模拟过程中保持供水和供砂速度不变。根据实测柴达木盆地格尔木 DFS 水道携砂量约为 45 kg/m^3 ^[19]，本实验设计水流量为 0.15 L/s，干砂的比重为 1.6 g/cm^3 ，计算出供砂速度为 $253 \text{ cm}^3/\text{min}$ 。本次实验共 35 期（Run1~Run35），每期实验 40 min。

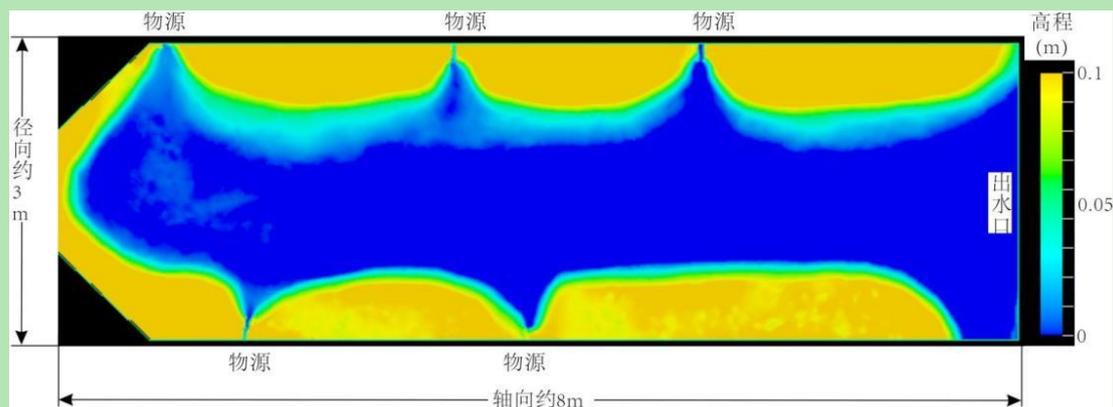


图2 实验初始地形图

Fig.2 Initial topography of the experiment

1.3 实验分析方法

每一期实验结束后将试验区积水抽干，使用照相机和无人机对沉积体的形态进行拍摄，使用激光扫描仪对沉积区进行扫描，获得每一期的高程数据^[35]。实验结束获得全部数据后使用本课题组编制的软件对获取的高程数据文件进行处理利用 Petrel 软件建立工区，导入处理好的文档后制作每一期的地形图以及每一期的增量图，结合实验过程中的记录以及图像、视频资料对其进行三维可视化分析。

2 沉积发育演化

2.1 沉积演化过程

实验开始后在供砂器处形成径向朵叶状沉积体，沉积体整体位于水下，并受水流影响偏向出水口一侧发育（图 3a）。随着径向沉积体不断发育，开始有部分位置露出水面，随着期次增加，露出水面的面积变大（图 3b）。与此同时，沉积区部分位置开始有轴向水流聚集，聚集的水流向沉积区的出水口方向流动，水流轻微破坏物源口沉积体。随着期次增加，径向沉积体堆积到水面以上，供砂器处的水流在下方的沉积体上侵蚀出水道（图 3c）。沉积区距离供砂器比较远的位置开始被填充，沉积区里的轴向水流也进一步聚集，轴向水流流速变快，破坏两侧沉积体，被破坏掉落到轴向水流的砂体被重新搬运卸载。最终径向沉积体表面的水流集中在一条流道，直接汇入轴向水流或者成为轴向水流的源头（图 3d），轴向水流在出水口附近形成多期叠置的朵叶状沉积。在沉积过程中，沉积区轴向水流发育特征、径向沉积体表面水流样式、主要新增沉积体的位置等多出现了显著的阶段性演化特征。

2.1.1 沉积区轴向水流演化过程

Run1~Run2 期间，供砂器处形成水下处于水下的单个径向朵叶状沉积体，并逐渐向沉积区深水处发育。此阶段沉积区水流整体向下缓慢移动，可以观察到水体向下流动对单个朵

体产生牵引拖拽作用，但观察不到明显的轴向水流（图 3a）；Run3~Run7 期间，随着沉积体不断生长扩大，沉积区部分位置两侧都发育了沉积体，沉积区的水流因为空间受限而开始聚集，由此形成了不连续的轴向水流（图 3b）；Run8~Run22 期间，前期形成的轴向水流对沉积体进行牵引拖拽，使同侧两个相邻的沉积体开始融合，同侧相邻两个沉积体中间的位置不断被填充，使水流进一步汇聚，在轴向上形成了连续的曲流河状水流（图 3c）；Run23~Run35 期间，轴向水流不断侵蚀沿岸沉积体，轴向水流搬运了大量沉积物至下游，形成多个多期叠置的决口沉积，这些决口沉积堵塞了轴向水流，水道不再固定（图 3d）。

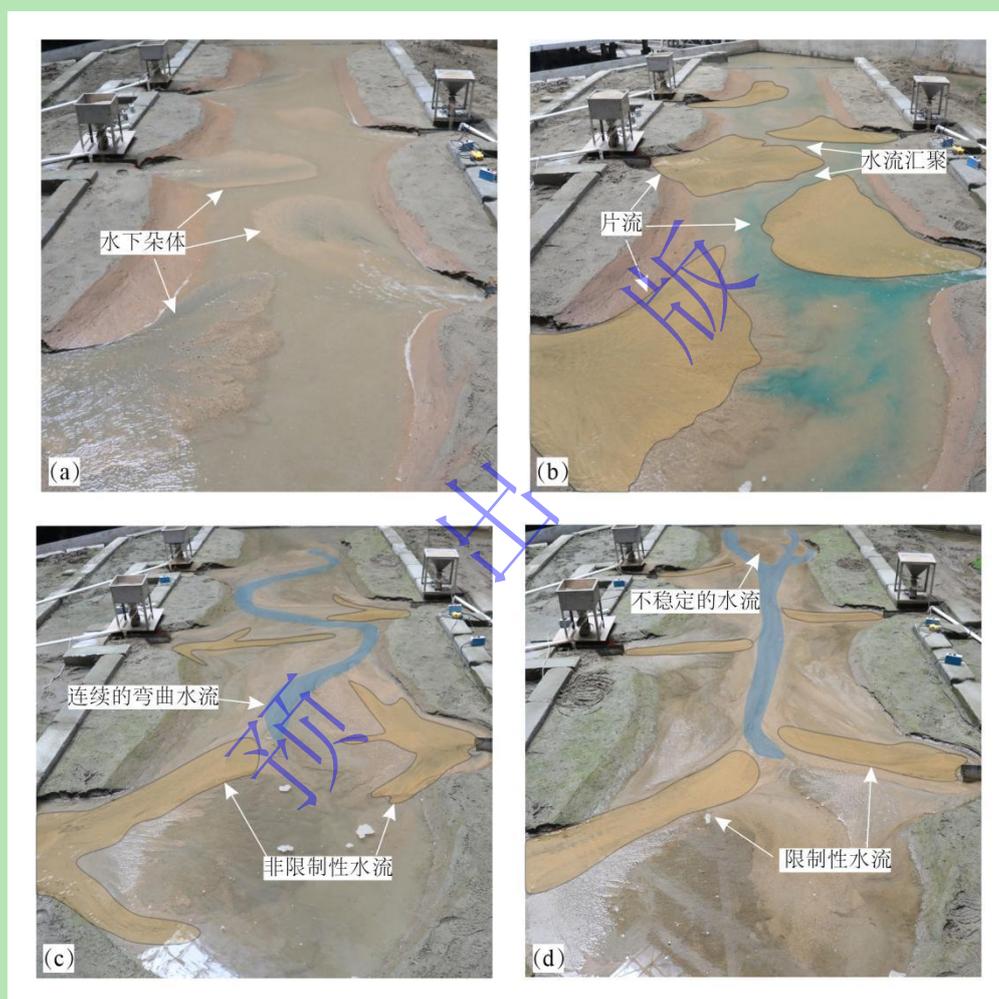


图 3 轴向水流和径向沉积体表面水流样式演化过程

(a) Run2; (b) Run6; (c) Run19; (d) Run27

Fig.3 Evolution of water flow patterns on the surface of axial and radial sediments

2.1.2 径向沉积体表面水流样式演化过程

Run1~Run3 期间，沉积体整体位于水面下，沉积体表面没有明显流道（图 3a）；Run4~Run7 期间沉积体开始露出水面，在物源口形成扇状、朵叶状、条带状沉积体，水流均匀地铺在沉积体表面向下流动。此时水流没有明显的汇聚，沉积体全部被水流覆盖，水流样式为片流（图

3b); Run8~Run22 期间, 沉积体表面部分位置被水流侵蚀, 沉积体表面的水流开始汇聚形成水道, 此时水流流道比较宽, 位置和规模不固定, 随着期次增加, 水道的位置会发生改变, 水流样式为非限制性水流 (图 3c); Run23~Run35 期间, 沉积体表面的水流进一步汇聚, 在沉积体表面侵蚀出稳定的流道, 水流样式为限制性水流, 物源处的水流直接汇入轴向河流或者转化为轴向水流的源头 (图 3d)。

2.1.3 沉积区地貌演化过程

Run1~Run2 期间, 新增沉积体主要在径向沉积体上或者其周缘, 沉积区其他位置没有发生沉积, 沉积区没有发生明显剥蚀 (图 4a); Run3~Run8 期间, 主要沉积位置仍然是径向沉积体周围, 但在沉积区其他位置也新增了少量沉积物, 例如物源口沉积体靠近盆地出水口一侧、沉积区远离物源的低洼区域和轴向上不连续水流的下游, 沉积区产生轴向水流的位置被轻微剥蚀 (图 4b); Run9~Run22 期间, 新增沉积体主要在轴向水流的两侧, 上游形成长条状沉积体, 下游形成朵叶状沉积体, 剥蚀发生在轴向水流的两侧 (图 4c); Run23~Run35 期间, 上游物源口沉积体和河道两侧沉积都有限, 新增沉积体主要在轴向河流下游, 由于上游可容空间比较小, 大量沉积物随着轴向水流被搬运到下游卸载, 形成厚层彼此叠置的沉积体, 剥蚀发生在轴向水流中流速较快的位置 (图 4d)。

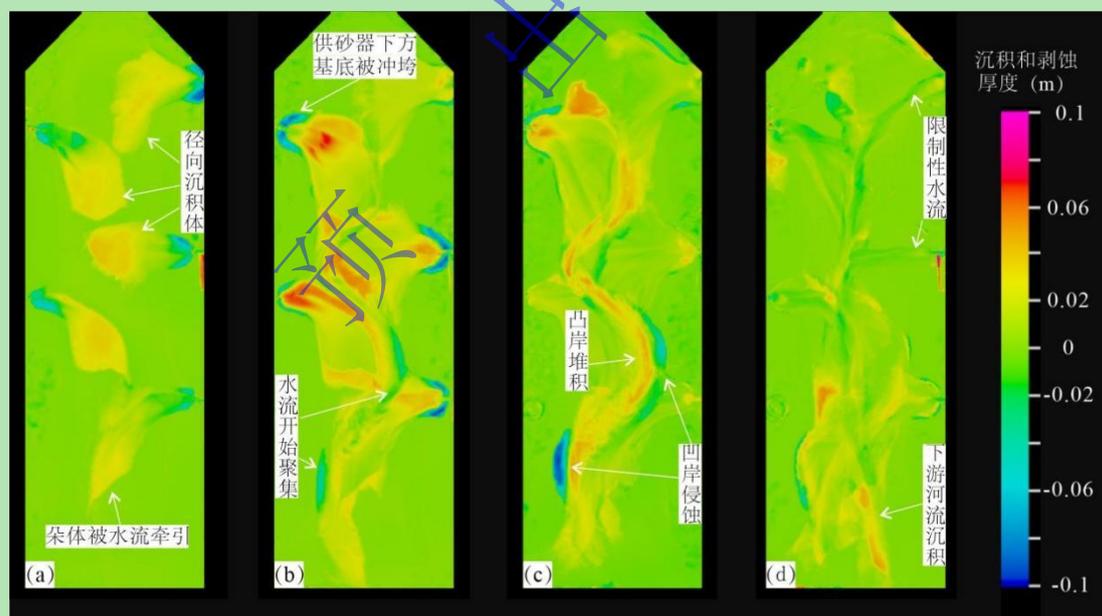


图 4 实验过程中新增沉积体以及被剥蚀位置

(a) Run1~Run2; (b) Run3~Run8; (c) Run9~Run22; (d) Run23~Run35

Fig.4 Added sediments and the stripped locations during the experiment

实验结果表明, 模拟过程中沉积区轴向水流发育特征、物源处沉积体表面水流样式、主要新增沉积体的位置等都会出现阶段性演化的特点。将不同现象演化的时间节点以及主要特征归纳在表格中, 可以发现不同现象在演化时间节点上有一定同步性 (表 1)。

表 1 实验过程中不同现象的阶段演化

Table 1 Staged evolution of different phenomena during the experiment

	Run1	Run2	Run3	Run4~Run7	Run8	Run9~Run22	Run23~Run35
沉积区轴向水流形态	无			不连续水流		稳定的弯曲水流	不断决口的水流
沉积体表面水流样式		无		片流		非限制性水流	限制性水流
新增沉积位置	物源口周围			主要在物源口，少量出现轴向水流下游		轴向水流凸岸一侧	轴向水流边滩和决口沉积
剥蚀位置	不明显			轴向水流形成部位		轴向水流凹岸一侧	物源口沉积体上稳定的流道

2.2 沉积演化阶段划分

本次水槽模拟实验初期在水下出现的朵叶状沉积体与浅水三角洲沉积类似，而后河道不断向沉积区延伸，沉积体高出水面的模式与分支河流体系（DFS）沉积相似，因此，本实验复现了在多面环山、多物源背景、排水通畅、构造稳定的低可容空间的狭长浅水湖盆沉积演化过程。依据以上观察的阶段化演化特征，结合前人研究成果，以湖盆中水体变化为关键特征可以将多物源的狭长湖盆沉积过程划分为浅水三角洲发育期、湖泊消亡期、曲流河发育期、曲流河决口期四个阶段。

2.2.1 浅水三角洲发育期（Run1~Run2）

发生于盆地沉积的初期，物源处供应的水和碎屑物质直接注入到湖盆中形成横向上发育不受限制的浅水三角洲。随着物源处的水流不断注入湖盆中，浅水三角洲不断地前积扩大，湖盆中水体缓慢向泄流口移动，湖盆中可容空间较大，水体移动不受约束，盆地中没有明显河道（图 5a）。

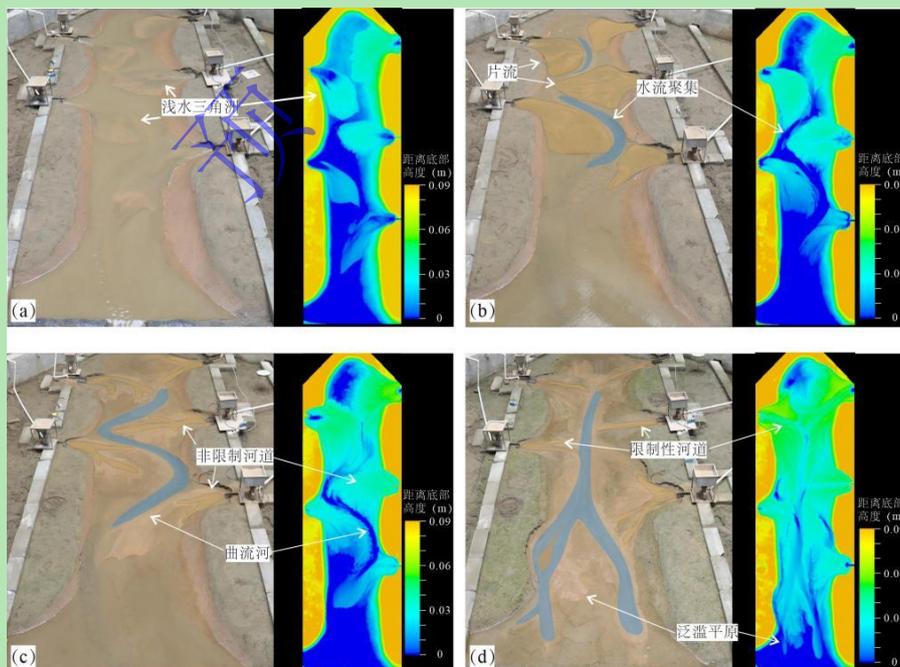


图 5 不同实验阶段的典型特征

(a) Run2; (b) Run7; (c) Run16; (d) Run33

Fig.5 Typical characteristics of different experimental stages

2.2.2 湖泊消亡期 (Run3~Run8)

随着新的沉积物随水流不断推进沉积,覆盖于前期浅水三角洲之上,使得沉积物开始露出水面,转化为 DFS 沉积并不断扩大。湖泊面积持续缩小,盆地中可供水体流动的区域不断减小,盆地中的水流在盆地中比较狭窄的位置聚集,形成了不连续的轴向河流,轴向河流开始改造并拖拽扇端沉积物,形成向泄流口偏转的窄条带状 DFS,这种窄条带状沉积体进一步填充了同侧两个相邻 DFS 尚未产生沉积的位置,促进了轴向水流的形成。这一时期 DFS 表面水流样式为片流,水流均匀覆盖于 DFS 表面,没有明显的流道(图 5b)。

2.2.3 曲流河发育期 (Run9~Run22)

随着 DFS 规模扩大,伴随轴向河流的拖拽作用,DFS 末端向敞流口方向不断延伸,相邻两个 DFS 开始融合。水流逐渐集中,轴向上形成一条连续的曲流河,水流流速不断变快,对 DFS 的破坏能力增大。快速流动的水流里携带了大量的沉积物堆积在水流的凸岸,在 DFS 两侧以及水流下游决口形成朵体,DFS 上流水聚集的部位受到侵蚀,新增沉积体集中在轴向水流沿岸和下游。该阶段 DFS 上的水流也逐步集中,片流的面积变小,汇聚成非限制性河道,河道覆盖部分 DFS 且流道不稳定,流道位置改变后前一期的流道会被充填,流道可延伸至 DFS 末端的轴向河流中(图 5c)。

2.2.4 曲流河决口期 (Run23~Run35)

随着湖盆被充填,远离湖盆出水口的 DFS 上的多级分流河道汇聚成为轴向曲流河的起点。在河流汇聚处,水流明显加速,形成局部超临界水流,下切作用明显。靠近湖盆出水口的下游位置轴向河水流下切与侧向侵蚀作用较强,不断改造 DFS 沉积物,并将沉积物搬运至湖盆出水口附近。这一阶段盆地上游 DFS 形态趋于稳定,DFS 体上的水流聚集成稳定的限制性河道,物源处供应的碎屑物质直接沿着这条限制性河道汇入轴向曲流河,在湖盆中下游曲流河不断决口形成大规模的河道沉积(图 5d)。

2.3 实验结果分析

2.3.1 湖盆水流样式的演化

1) DFS 表面水流样式的演化

当 DFS 刚形成时,虽然地形坡度较大,但盆地可容空间大,水流在各方向均不受阻,携带沉积物的水流从 DFS 表面往盆地中心迁移,表面被片流均匀覆盖。随着沉积物不断堆积变高,水流开始对 DFS 部分位置进行侵蚀形成不稳定的流道,随着流道前方被沉积物堵塞,河流又会从其他可容空间大的位置流出,此阶段河道形态为非限制性河道,河道会不断迁移改道。当 DFS 上堆积了足够多的沉积物导致没有空间供河流改道时,会在 DFS 表面侵

蚀处一条稳定的河道,水流和泥沙沿着这个河道汇入轴向河流,此时河道样式为限制性河道。

2) 轴向河流的演化

在盆地沉积初期,盆地可容空间大,盆地中水体宽且深,此时随着物源处水流的注入,盆地中水体缓慢向下游流动,没有明显的河道。随着 DFS 向盆地中心扩张,盆地中部分位置因为两侧 DFS 发育,使水流集中从两侧相对的 DFS 中间通过,盆地中开始出现不连续的河流。DFS 不断发育,盆地中远离物源口的位置也被填充,盆地中水流进一步集中,开始形成连续的曲流河,并且对河道附近 DFS 有一定破坏作用。最终,DFS 上的水流携带砂体直接流入轴向曲流河,在盆地下游形成多期叠置的朵体,盆地可容空间进一步降低,曲流河被堵塞,开始决口形成广泛的河流沉积。

2.3.2 DFS 的终止方式

DFS 的终止方式主要取决于 DFS 的规模、盆地规模、DFS 末端地形等因素, *Hartley et al.*^[2] 提出,盆地中发育的 DFS 的终止方式有 5 种:(1) 汇入其他体系,DFS 在末端汇合成为一点后流入其他体系;(2) 汇入轴向体系后终止,DFS 的主河道汇入轴向河流体系;(3) 转变为轴向体系,DFS 上主要的河道变为轴向河流体系;(4) 终止在岸线、湖泊、干盐湖;(5) 终止在沙丘、干盐湖、湿地等处。

在本实验中,距离盆地出水口较远的 DFS 上的水流汇聚成为轴向河流的源头,距离那盆地出水口较近的 DFS 上的水流会通过 DFS 上的限制性河流直接汇入轴向河流。以上两种情况分别对应 *Hartley et al.*^[2] 提出的“转变为轴向体系”和“汇入轴向体系后终止”两种终止方式(图 6)。

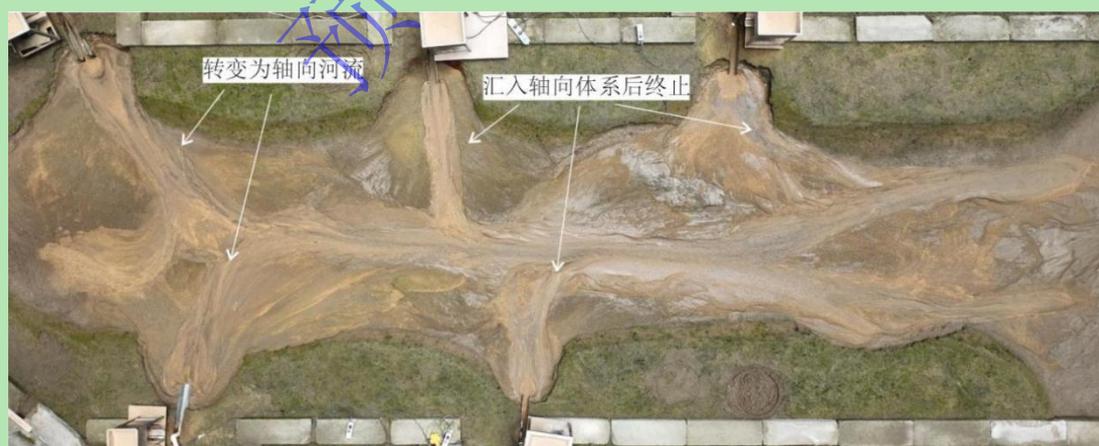


图 6 实验结束后 DFS 的终止方式

Fig.6 Termination type of the distributive fluvial system (DFS) at the end of the experiment

2.3.3 各沉积单元之间的影响关系

盆地同侧相邻和盆地两侧相对的两个 DFS 会互相制约对方的发育。如果同侧相邻的两

个 DFS 相距太近, 来自两个物源的沉积物会在两个 DFS 间交替堆积。狭长湖盆两侧相对的两个 DFS 向盆地中间发育会导致水流在两个 DFS 的扇端汇聚, 导致这两个 DFS 的扇端均容易受到轴向水流破坏。

轴向水流对单个 DFS 的影响也十分显著, 越到下游越明显。在 DFS 发育前期, 盆地水流整体往下游移动, 受水流影响 DFS 发育新增沉积体也集中在靠近水流下游一侧, 下游水流更大, 这种影响也更显著。在 DFS 发育中后期, 盆地中形成了轴向曲流河, 也会对 DFS 末端进行破坏。

2.3.4 浅水三角洲的发育条件

在半封闭的狭长盆地中, 决定是否出现浅水三角洲的关键因素是盆地沉积初期盆地中是否有较深的水体。如果盆地沉积初期盆地中水体较深, 物源处供应的水和碎屑物质会先在湖泊中形成浅水三角洲, 湖泊的深度决定了浅水三角洲的规模, 当浅水三角洲发育到一定程度后开始发育 DFS。如果盆地沉积初期水体很浅, 盆地排水通畅, 则会在物源口直接形成 DFS。

3 狭长浅水湖盆分支河流体系沉积模式

3.1 现代狭长浅水湖盆分支河流体系类比

小尤尔都斯盆地位于新疆维吾尔自治区和静县 ($84^{\circ}25' \sim 86^{\circ}01' E$, $42^{\circ}68' \sim 43^{\circ}22' N$), 东西长约 140 km, 南北宽约 50 km, 盆地面积约 $3\ 027\ km^2$ (图 7), 盆地海拔约 2 500 m, 两侧被积雪覆盖的山地海拔高于 3 500 m^[36]。盆地南北两侧汇水区形成的水流携带碎屑物质进入盆地后形成了大小不一的多期 DFS, 水流从 DFS 顶点开始呈放射状向下展布, 并在盆地中汇合形成轴向曲流河, 即开都河。



图 7 小尤尔都斯盆地示意图

(a) 小尤尔都斯盆地位置图; (b) 小尤尔都斯盆地卫星图

Fig.7 Schematic diagram of the Small Yourdusi Basin

根据高清卫星图, 划分出了小尤尔都斯盆地各个位置的沉积相 (图 8)。在该盆地识别出了大小不一的多个不同时期形成的 DFS。DFS 上的水流注入轴向河流中, 或者汇聚到盆

地的湖泊中。盆地中形成一条流量较大的轴向曲流河，并不断决口和截弯取直形成大规模的河流沉积，部分河流沉积因为气候等原因发育为盐沼和风成砂丘。

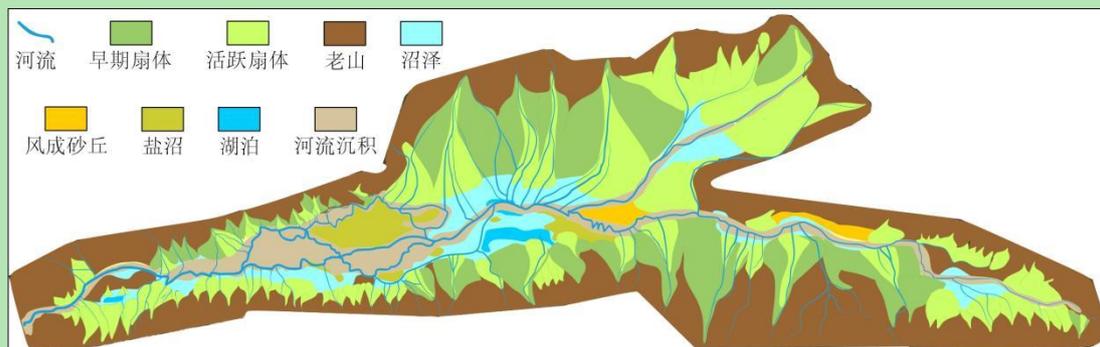


图 8 小尤尔都斯盆地沉积相划分

Fig.8 Sedimentary facies classification of the Small Yourdusi Basin

由盆地西南侧的出水口形态可知，该出水口可能是由河流袭夺后形成的深切河谷，所以该盆地再某个历史时期可能保持一定水深，在这一时期可能会形成三角洲，南北两侧堆积位置较高的“早期扇体”可能就是深水时期的扇三角洲沉积。当袭夺完成后湖盆水体随着通过河谷外泄，湖盆水体变浅，物源处的沉积体开始进积，形成浅水三角洲或者 DFS。盆地东侧的 DFS 上的水流汇聚成向西流动的轴向河流，属于“转变为轴向体系”型；盆地西侧的 DFS 部分直接流入轴向河流，属于“汇入轴向体系后终止”型；其他 DFS 则终止于盆地中形成的湖泊、沼泽、风成砂丘或盐沼，属于“终止在岸线，湖泊、干盐湖”和“终止在沙丘、干盐湖、湿地等处”。小尤尔都斯盆地 DFS 表面的水流以限制性河道为主，水流汇聚成轴向河流后对两侧的 DFS 产生了明显的侵蚀作用，同时在盆地中形成了大规模的河流沉积。

小尤尔都斯盆地具有多面环山、多物源背景、排水通畅、低可容空间等特点，与本文探讨的狭长浅水湖盆十分相近，盆地中的水流样式、DFS 的终止方式、各沉积单元的影响关系、三角洲的发育等方面也有诸多相似。因此，小尤尔都斯盆地发育模式也为狭长浅水湖盆分支河流体系沉积模式的构建提供参考。

3.2 狭长浅水湖盆分支河流体系沉积模式

3.2.1 平面发育模式

基于水槽模拟实验沉积现象、采集整理的试验区数据和野外露头分析将位于狭长、流水通畅、具备多个物源的浅水湖盆中发育的分支河流体系沉积过程划分为浅水三角洲发育期、湖泊消亡期、曲流河发育期、曲流河决口期阶段。

浅水三角洲发育期在物源口发育浅水三角洲或者浅水三角洲，各个冲积扇之间彼此独立，不发育轴向河流（图 9a）。湖泊消亡期沉积体开始露出水面，并不断扩大，不断限制盆地水

体流动,水流在狭窄位置聚集形成不连续的轴向河流,轴向河流拖拽改造 DFS 末端,使 DFS 向轴向河流下游发育。该阶段 DFS 表面水流样式为片流,水流均匀覆盖在表面,沉积物堆积在 DFS 上以及周缘,靠近轴向水流的 DFS 末端可能会被破坏(图 9b)。曲流河发育期轴向河流继续拖拽使扇端向敞流口延伸,相邻 DFS 开始融合。盆地水流逐渐集中,形成连续的曲流河,曲流河进一步剥蚀沿岸 DFS。该阶段 DFS 表面水流样式为非限制性河道,物源处供应的碎屑物质被水流搬运到扇端或者轴向水流中,新增沉积体主要是曲流河边滩沉积以及下游决口沉积(图 9c)。曲流河决口期各个 DFS 上的水流转变为限制性河道,远离出水口位置的 DFS 上的河道转变为曲流河的起点,靠近盆地出水口位置的 DFS 上的河道直接汇入曲流河或者沼泽、湖泊等,物源处供应的水和碎屑物质直接进入曲流河,曲流河下游开始决口,盆地出水口一侧形成宽阔的泛滥平原(图 9d)。

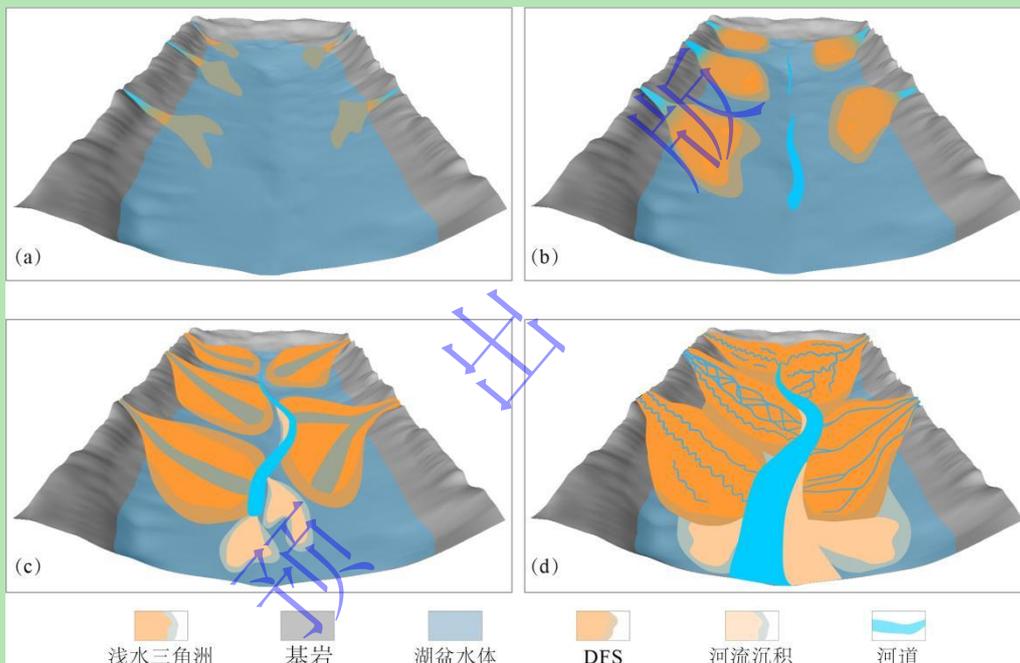


图9 狭长浅水湖盆 DFS 平面发育模式

(a) 浅水三角洲发育期; (b) 湖泊消亡期; (c) 曲流河发育期; (d) 曲流河决口期

Fig.9 DFS planar development pattern in a narrow shallow lacustrine basin

3.2.2 平面砂体展布规律

从最终的沉积厚度图来看,多物源狭长湖盆呈现出“满盆砂”的沉积特点,其平面砂体展布模式为:远离盆地出水口的位置主要是浅水三角洲沉积和 DFS 沉积,靠近盆地出水口的位置主要是泛滥平原。但值得注意的是,DFS 在轴向河流以及所在区域地形的共同作用下,可能会发育成不规则的扇形:如果 DFS 所在区域远离出水口一侧高于靠近出水口一侧,DFS 会在地形和轴向河流的作用下向盆地出水口一侧发育,最终形成长条形的 DFS;如果 DFS 两侧海拔高度相近,DFS 会因为轴向河流的拖拽偏向盆地出水口发育;如果 DFS 所在

区域远离出水口一侧低于靠近出水口一侧，则要视哪种因素对 DFS 发育影响更大而讨论。

盆地中靠近出水口的一侧，无论附近有没有物源供应，都可能形成大面积的厚层河流沉积。由上文沉积阶段划分和描述可知，进入曲流河决口期以后，DFS 表面形成限制性河道，DFS 发育进程缓慢，物源处的水和碎屑物质直接进入曲流河，并在下游卸载，形成泛滥平原，沉积时间越久，下游泛滥平原规模越大（图 10）。

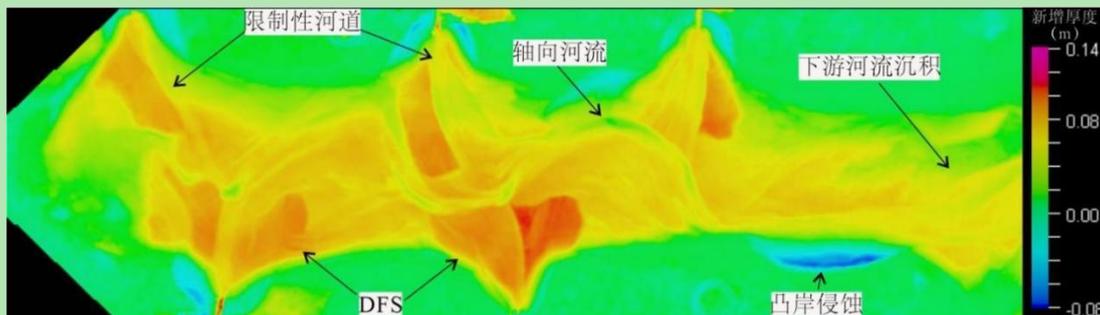


图 10 新增砂体平面展布

Fig.10 Planar spreading of added sand bodies

3.2.3 垂向发育模式

将每个期次沉积结束后的表面制作成三维平面，将每一期的平面进行叠加，选取了三个剖面，剖面 A 从纵向穿过了 DFS（浅水三角洲）沉积、轴向河道和下游泛滥平原，剖面 B 横向穿过一个完整 DFS、轴向河流和一个 DFS 末端，剖面 C 在轴向河流下游横向穿过下游泛滥平原和河道（图 11）。

根据剖面图可以总结以下狭长湖盆 DFS 垂向发育特征：（1）轴向河流的中上游位置如果附近有物源，垂向上从下到上分别发育浅水三角洲沉积和 DFS 沉积；如果附近没有物源，从下到上分别发育 DFS 沉积和曲流河沉积，底部可能有少量细粒的浅水三角洲沉积。（2）轴向河流的下游主要发育河流沉积，底部可能有少量拖拽到下游的 DFS 沉积。（3）根据不同颜色的线条可以观察到每一期沉积的最高表面，如果某期线条位于其前一期线条之上，表示这一期在这个位置发生了沉积，反之则是被剥蚀。由剖面图可以发现轴向河流上游被剥蚀的位置比较少，剥蚀主要发生在 DFS 表面的限制性河道以及轴向河流。轴向河流下游水流量较大且流速较快，同时河道频繁被阻塞改道，发生的剥蚀现象比较多。（4）因为轴向河流水动力较强，会对沿岸的沉积体产生剥蚀作用，在盆地中间远离物源的位置可能会形成粒度较粗的河流沉积。

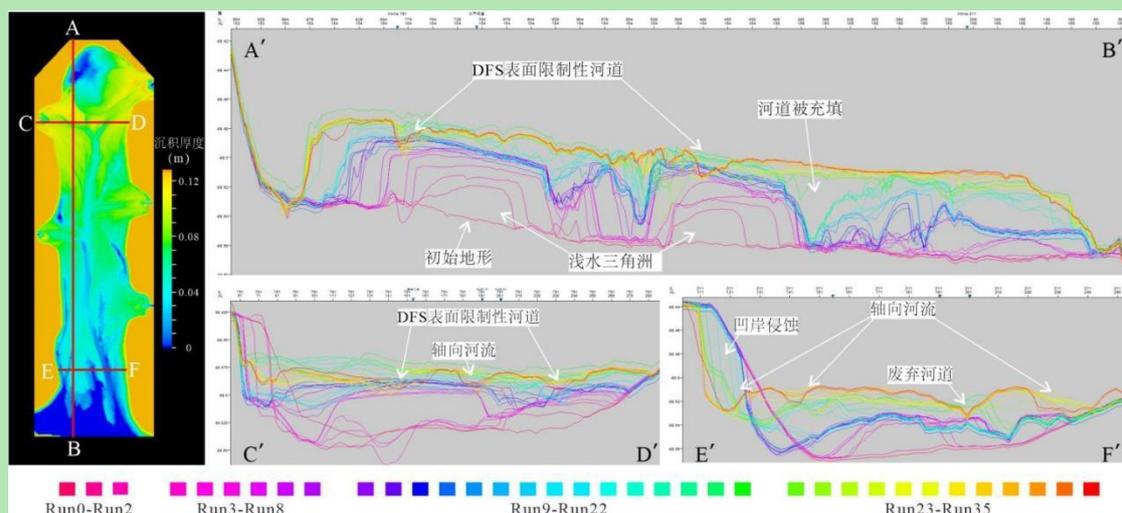


图 11 各沉积期次叠置关系

Fig.11 Stacking relationship of each sedimentary period

4 结论

(1) 狭长浅水湖盆发育的多个 DFS 沉积过程可以分成四个阶段：①浅水三角洲发育期，该阶段会在物源位置发育浅水三角洲；②湖泊消亡期，该阶段湖泊面积不断减小，湖盆中的水体开始汇聚，在物源位置发育小型 DFS，湖泊面积减小；③曲流河发育期，该阶段同侧两个相邻 DFS 之间的区域被填充，轴向河流发育为连续的曲流河，DFS 靠近轴向水流的位置被剥蚀；④曲流河决口期，该阶段 DFS 表面被水流侵蚀，下切形成限制性河道，物源供应的水和碎屑物质直接进入轴向河流后在下游沉积。

(2) 狭长浅水湖盆中发育多个 DFS 并形成轴向河流后，轴向河流中下游两侧发育的 DFS 水流大多直接汇入轴向河流，终止方式为“终止于轴向河流”型；轴向河流上游区域发育的 DFS 水流彼此汇聚，成为轴向河流的源头，终止方式为“转变为轴向河流”型。

(3) 发育多个 DFS 的浅水狭长湖盆具有“满盆砂”的特点：湖盆远离出水口一侧主要发育三角洲和 DFS 沉积；湖盆靠近出水口一侧轴向河流侵蚀两侧的沉积体并向下游搬运，形成广泛的河流沉积。

参考文献 (References)

- [1] Weissmann G S, Hartley A J, Nichols G J, et al. Fluvial form in modern continental sedimentary basins: Distributive fluvial systems[J]. *Geology*, 2010, 38(1): 39-42.
- [2] Hartley A J, Weissmann G S, Nichols G J, et al. Large distributive fluvial systems: Characteristics, distribution, and controls on development[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2010, 80(2): 167-183.
- [3] 张昌民, 胡威, 朱锐, 等. 分支河流体系的概念及其对油气勘探开发的意义[J]. *岩性油气藏*, 2017, 29 (3): 1-9. [Zhang Changmin, Hu Wei, Zhu Rui, et al. Concept of distributive fluvial system and its significance to oil and gas exploration and development[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(3): 1-9]

- [4] 孟庆昊, 张昌民, 张祥辉, 等. 塔里木盆地现代分支河流体系形态、分布及其主控因素[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(4): 44-56. [Meng Qinghao, Zhang Changmin, Zhang Xianghui, et al. Morphology, distribution and main controlling factors of modern distributive fluvial system in Tarim Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(4): 44-56.]
- [5] 余宽宏, 金振奎, 李桂仔, 等. 准噶尔盆地克拉玛依油田三叠系克下组洪积砾岩特征及洪积扇演化[J]. 古地理学报, 2015, 17(2): 143-159. [Yu Kuanhong, Jin Zhenkui, Li Guizai, et al. Conglomerate characteristics and alluvial fan evolution of the Triassic Lower Karamay Formation in Karamay oilfield, Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(2): 143-159.]
- [6] 张磊, 张昌民, 赵康, 等. 玛湖凹陷二叠系—三叠系沉积模式与分支河流体系演变[J]. 石油地质与工程, 2023, 37(4): 1-10. [Zhang Lei, Zhang Changmin, Zhao Kang, et al. Permian-Triassic sedimentary model and distributive fluvial system evolution of Mahu Sag, Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2023, 37(4): 1-10.]
- [7] 冯文杰, 吴胜和, 印森林, 等. 准噶尔盆地西北缘三叠系干旱型冲积扇储层内部构型特征[J]. 地质论评, 2017, 63(1): 219-234. [Feng Wenjie, Wu Shenghe, Yin Senlin, et al. Internal architecture characteristics of Triassic arid alluvial fan in northwestern margin of Junggar Basin[J]. Geological Review, 2017, 63(1): 219-234.]
- [8] 田军. 塔里木盆地库车坳陷白垩系—第三系沉积相及储层分布预测研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2005. [Tian Jun. The research for distribution and prediction of Cretaceous and tertiary sedimentary Facies and reservoir Beds in Kuche Depression, Tarim Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.]
- [9] 贾进华. 塔里木盆地早白垩世沉积相特征与古地理[J]. 古地理学报, 2009, 11(2): 167-176. [Jia Jinhua. Sedimentary characteristics and palaeogeography of the Early Cretaceous in Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(2): 167-176.]
- [10] 李鑫, 钟大康, 李勇, 等. 塔里木盆地库车坳陷新近系和第四系沉积特征及演化[J]. 古地理学报, 2013, 15(2): 169-180. [Li Xin, Zhong Dakang, Li Yong, et al. Sedimentary characteristics and evolution of the Neogene and Quaternary in Kuqa Depression of Tarim Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(2): 169-180.]
- [11] 宫清顺, 刘占国, 宋光永, 等. 柴达木盆地昆北油田冲积扇厚层砂砾岩储集层内部隔夹层[J]. 石油学报, 2019, 40(2): 152-164. [Gong Qingshun, Liu Zhanguo, Song Guangyong, et al. Inter-layers in alluvial-fan thick sandy conglomerate reservoir of Kunbei oilfield, Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(2): 152-164.]
- [12] 梅冥相, 刘少峰. 基于陆生植被对河流沉积作用的影响论上三叠统须家河组的冲积构架: 以重庆永川普安剖面为例[J]. 古地理学报, 2013, 15(2): 143-154. [Mei Mingxiang, Liu Shaofeng. Discussion of alluvial architecture for the Upper Triassic Xujiahe Formation in terms of sedimentological impact of terrestrial vegetation on fluvial sedimentation: A case study at Pu'an section in Yongchuan of Chongqing[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(2): 143-154.]
- [13] 徐兆辉, 胡素云, 汪泽成, 等. 古气候恢复及其对沉积的控制作用: 以四川盆地上三叠统须家河组为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 235-244. [Xu Zhaohui, Hu Suyun, Wang Zecheng, et al. Restoration of paleoclimate and its geological significance: As an example from Upper Triassic Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2): 235-244.]
- [14] 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段古沉积环境恢复及意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 936-946. [Fu Jinhua, Li Shixiang, Xu Liming, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(6): 936-946.]
- [15] 肖红平, 刘锐娥, 张福东, 等. 鄂尔多斯盆地二叠系盒8段沉积模式重建及其勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 268-280. [Xiao Hongping, Liu Ruie, Zhang Fudong, et al. Sedimentary model reconstruction and exploration significance of Permian He 8 member in Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 268-280.]
- [16] 尹泽, 刘自亮, 彭楠, 等. 鄂尔多斯盆地西缘上三叠统延长组沉积相特征研究[J]. 沉积学报, 2019, 37(1): 163-176. [Yin Ze, Liu Ziliang, Peng Nan, et al. Study on sedimentary Facies features of the Upper Triassic Yanchang Formation, in the western Margin, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(1): 163-176.]
- [17] 郭艳琴, 惠磊, 张秀能, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积体系特征及湖盆演化[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 593-602. [Guo Yanqin, Hui Lei, Zhang Xiuneng, et al. Sedimentary system characteristics and lake Basin evolution of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2018, 48(4): 593-602.]
- [18] 何苗, 秦兰芝, 尹太举, 等. 分支河流体系在东海西湖凹陷南部的运用及其对油气潜力的指示[J]. 中国地质, 2021, 48(3):

- 820-831. [He Miao, Qin Lanzhi, Yin Taiju, et al. The application of the distributive fluvial system in the South Xihu Depression, East China Sea and its indication of oil and gas potential[J]. *Geology in China*, 2021, 48(3): 820-831.]
- [19] 吕峻岭, 朱一杰, 夏瑞, 等. 干旱型分支河流体系沉积特征与演化过程: 水槽沉积模拟实验研究[J]. *沉积学报*, 2020, 38(5): 994-1005. [Lü Junling, Zhu Yijie, Xia Rui, et al. Sedimentary characteristics and evolution process of arid distributive fluvial systems: Insights from a flume-tank experiment[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(5): 994-1005.]
- [20] Weissmann G S, Hartley A J, Scuderi L A, et al. Fluvial geomorphic elements in modern sedimentary basins and their potential preservation in the rock record: A review[J]. *Geomorphology*, 2015, 250: 187-219.
- [21] Hartley A J, Owen A. Paleohydraulic analysis of an ancient distributive fluvial system[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2022, 92(5): 445-459.
- [22] Davidson S K, Hartley A J, Weissmann G S, et al. Geomorphic elements on modern distributive fluvial systems[J]. *Geomorphology*, 2013, 180-181: 82-95.
- [23] Owen A, Nichols G J, Hartley A J, et al. Vertical trends within the prograding Salt Wash distributive fluvial system, SW United States[J]. *Basin Research*, 2017, 29(1): 64-80.
- [24] 张元福, 戴鑫, 王敏, 等. 河流扇的概念、特征及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 947-957. [Zhang Yuanfu, Dai Xin, Wang Min, et al. The concept, characteristics and significance of fluvial fans[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 947-957.]
- [25] 李相博, 刘化清, 邓秀芹, 等. 干旱环境河流扇概念与鄂尔多斯盆地延长组“满盆砂”成因新解[J]. *沉积学报*, 2021, 39(5): 1208-1221. [Li Xiangbo, Liu Huaqing, Deng Xiuqin, et al. The concept of fluvial fans in an arid environment: A new explanation of the origin of “sand-filled basins” in the Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(5): 1208-1221.]
- [26] 朱筱敏, 叶蕾, 谢爽慧, 等. 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[J]. *古地学报*, 2023, 25(5): 959-975. [Zhu Xiaomin, Ye Lei, Xie Shuanghui, et al. Sedimentary models and case study of sand-rich shallow-water delta in continental lacustrine basins with low accommodation[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(5): 959-975.]
- [27] 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流拗陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. *地质学报*, 2008, 82(6): 813-825. [Zou Caineng, Zhao Wenzhi, Zhang Xingyang, et al. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(6): 813-825.]
- [28] 朱筱敏, 刘媛, 方庆, 等. 大型拗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.]
- [29] 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 等. 大型拗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[J]. *地学前缘*, 2013, 20(2): 19-28. [Zhu Xiaomin, Deng Xiuqin, Liu Ziliang, et al. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: An example from Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(2): 19-28.]
- [30] 朱筱敏, 潘荣, 赵东娜, 等. 湖盆浅水三角洲形成发育与实例分析[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5): 7-14. [Zhu Xiaomin, Pan Rong, Zhao Dongna, et al. Formation and development of shallow-water deltas in lacustrine Basin and typical case analyses[J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(5): 7-14.]
- [31] 鲁静, 邵龙义, 汪浩, 等. 低可容空间河流三角洲沉积层序与聚煤模式[J]. *中国矿业大学学报*, 2012, 41(2): 268-275. [Lu Jing, Shao Longyi, Wang Hao, et al. Sequence stratigraphy and coal accumulation of fluvial delta under low accommodation conditions[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(2): 268-275.]
- [32] 叶蕾, 朱筱敏, 秦祎, 等. 断陷湖盆浅水三角洲沉积体系[J]. *地球科学与环境学报*, 2018, 40(2): 186-202. [Ye Lei, Zhu Xiaomin, Qin Yi, et al. Depositional system of shallow water delta in rifted lacustrine Basin[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2018, 40(2): 186-202.]
- [33] 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. Sallow-water deltas and models[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 933-944.]
- [34] 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.]
- [35] 任大伟, 魏思源, 尹太举, 等. 湖平面变化背景下指状砂坝型浅水三角洲沉积响应过程: 基于水槽沉积模拟实验[J/OL]. *现代地质*, <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2024.002>. [Ren Dawei, Wei Siyuan, Yin Taiju, et al. Sedimentary response process of fingered bar type shoal water delta under lake level fluctuations: Based on flume tank experiments[J]. *Geoscience*. <https://doi.org/10.19657/j.geoscience.1000-8527.2024.002>.]
- [36] 陈春珠, 黄小忠, 彭卫, 等. 天山南坡小尤尔都斯盆地地表土孢粉初步研究[J]. *冰川冻土*, 2012, 34 (6): 1526-1534. [Chen Chunzhu, Huang Xiaozhong, Peng Wei, et al. Study of surface sporo-pollen in the small Yourdusi Basin on the Southern Slopes of the Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1526-1534.]

Evolution and Depositional Model of a Distributive Fluvial System in a Narrow and Shallow Lacustrine Basin: Insights from flume simulation experiment

LI SaiYun¹, YIN TaiJu¹, ZHANG ChangMin¹, SUN ZhongHeng¹, REN DaWei², WEI Meng¹, CHEN Xuan³

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. CNOOC Zhanjiang Branch, Zhanjiang, Guangdong 524057, China

3. Research Institute of Exploration and Development, Tuha Oil Field Company, PetroChina, Hami, Xinjiang 839009, China

Abstract: [Objective] Distributive fluvial systems (DFS) are widely developed in modern and ancient sedimentary strata and they are important hydrocarbon reservoirs. Multiple interacting DFS and evolving axial rivers may be developed in a narrow, shallow lacustrine basin with low accommodation. [Methods] Reproducing the deposition process through flume simulation experiments, this study used a high-precision three-dimensional (3D) scanner with a self-developed program to visual analyze the deposition area and clarify the stage-by-stage evolution characteristics of the DFS. [Results] (1) With the expansion of the DFS scale, the water flow on its surface gradually aggregates; the initial flow pattern is sheet flow, which then evolves into unrestricted and restricted flow; (2) as the basin can accommodate less space, the axial water flow in the basin gradually aggregates into an axial river, which has a destructive effect on the two sides of the DFS and constantly breaks, forming a large-scale fluvial deposition; (3) when multiple DFS are developed in a narrow, shallow lacustrine basin, the sedimentary sands are concentrated at the DFS near the source and downstream of the axial river, and the longer basin development time indicates a larger scale of fluvial deposition. [Conclusions] This study describes the developmental processes and sand body spreading patterns of multiple DFS and axial rivers developed in a narrow, shallow lacustrine basin with low accommodation and sufficient supply of material sources at the basin scale, providing theoretical support for oil and gas exploration and the study of distributive fluvial systems.

Key words: distributive fluvial system; low accommodation; flume simulation experiment; sedimentary characteristics; Small Yourdusi Basin