

干旱型分支河流体系朵体构型及沉积特征： 水槽沉积模拟实验研究

夏 雨^{1,2} 王俊辉^{1,2} 向显鹏³ 马福康^{1,2}
叶慧如⁴ 何一鸣⁴ 张 伟^{1,2}

- 1 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京 102249
2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249
3 中国石油新疆油田采油一厂, 新疆克拉玛依 834000
4 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

摘 要 干旱型分支河流体系规模较大、砂体发育, 可形成大规模油气储集层, 是国内外学者关注和研究的热点领域。文中以干旱型分支河流体系为研究对象, 通过水槽沉积模拟实验研究了其动态演化过程、沉积特征及内部构型样式。研究表明: 在干旱型分支河流体系中, 朵体是基本的沉积单元, 其沉积演化在整个体系的形成和发展中占据核心地位。根据形成过程, 可以将朵体划分为侧积型、摆动型、加积型 3 种类型, 其构型特征在剖面上分别呈侧向、无序和垂向堆叠, 朵体的发育位置、规模与形态也具有明显差别。其中, 侧积型朵体主要发育于扇体侧缘, 其面积、长度、宽度均较大, 长宽比和宽厚比也较大, 形态偏扇形; 摆动型朵体主要发育于扇体前缘, 其面积、长度、宽度及其长宽比和宽厚比同样较大, 平面上呈扇形; 加积型朵体主要发育于扇根两侧, 其面积与长度、宽度均相对较小, 长宽比及宽厚比也相对较小, 呈舌型。干旱型分支河流体系演化过程中存在“水道下切→朵体前积→朵体侧向迁移→朵体溯源迁移→水道再次下切”的自旋回过程, 该过程在分支河流体系演化的不同阶段表现出一定的规律性和周期性。研究结果对分析干旱型分支河流体系的沉积过程、沉积特征、内部构型等具有一定的参考意义。

关键词 干旱型分支河流体系 水槽实验 沉积演化 朵体类型 沉积构型 自旋回过程

第一作者简介 夏雨, 男, 2001 年生, 硕士研究生, 主要从事沉积学与实验地层学研究。E-mail: 2023210044@student.cup.edu.cn。

通讯作者简介 王俊辉, 男, 1988 年生, 副教授, 博士生导师, 主要从事沉积学与实验地层学研究。E-mail: wangjunhui@cup.edu.cn。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Configuration and depositional characteristics of lobe of arid distributive fluvial system: a flume experimental study of depositional simulation

XIA Yu^{1,2} WANG Junhui^{1,2} XIANG Xianpeng³ MA Fukang^{1,2}
YE Huiru⁴ HE Yiming⁴ ZHANG Wei^{1,2}

- 1 National Key Laboratory of Oil and Gas Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
2 School of Earth Sciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China
3 NO.1 Production Plant of Xinjiang Oilfield Branch Company, PetroChina, Xinjiang Karamay 834000, China
4 School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract Arid distributive fluvial systems (ADFS) have attracted considerable academic interest due to their large spatial extent and potential for hydrocarbon reservoir development. This study focuses on the arid distributive fluvial system, analyzing its dynamic evolution, depositional characteristics, and internal configuration through flume experiments. The findings are as follows: (1) In arid distributive fluvial systems, lobes act as the fundamental depositional building blocks, exerting primary control over system formation and evolution. (2) Based on their formation processes, lobes can be categorized into three types: lateral, oscillating, and accretionary. In cross-sectional view, these types display characteristic stacking patterns: lateral, irregular, and vertical, respectively. Lateral lobes develop primarily along the fan margins and are characterized by large area, length, and width, with high aspect and width-to-thickness ratios and a lobate geometry. Oscillatory lobes occur at the fan front, sharing similar dimensions and morphology. In contrast, accretionary lobes are smaller, develop near the fan apex, and exhibit lower aspect and width-to-thickness ratios, with a tongue-shaped geometry. (3) Throughout the evolution of the arid distributive fluvial system, a cyclical process of 'channel incision-lobe front accumulation-lobe lateral migration-lobe backward migration-channel re-incision' is observed, demonstrating regularity and periodicity at various stages of the system's evolution. These findings enhance the understanding of sedimentary processes, internal architectures, and spatial evolution within arid distributive fluvial systems, and offer guidance for reservoir prediction in analogous depositional settings.

Key words arid distributive fluvial system, flume experiment, sedimentary evolution, lobe type, sedimentary configuration, autogenic cycle

About the first author XIA Yu, born in 2001, master's degree candidate, is engaged in researches on sedimentology and experimental stratigraphy. E-mail: 2023210044@student.cup.edu.cn.

About the corresponding author WANG Junhui, born in 1988, associate professor, Ph.D. supervisor, is engaged in researches on sedimentology and experimental stratigraphy. E-mail: wangjunhui@cup.edu.cn.

0 引言

分支河流体系 (Distributive Fluvial System, DFS) 是指河流从某一顶点进入盆地后, 呈放射状展布的沉积体系。这一概念由 Weissmann 等 (2010) 首次提出。由于学术界对这一体系有不同的命名习惯, 如冲积扇、洪积扇和巨型扇等, 因此 Hartley 等 (2010) 综合了以往的研究, 提出分支河流体系包括最大规模的巨型扇 (半径大于 100 km)、较大规模的河流扇 (半径为 30 ~ 100 km) 以及小规模冲积扇 (半径小于 30 km)。分支河流体系概念的提出, 打破了传统分类中对尺度的严格限制, 将不同尺度的扇状体纳入同一体系, 强调了放射状河道体系的共同特征, 突出了从冲积扇到巨型扇等扇状沉积体系在沉积机制和水动力条件上的共性, 从而有助于更好地理解各类扇状体的形成和演化过程, 并为地质资源的勘探与开发提供了新的视角。

分支河流体系广泛见于古代沉积地层记录中和现代沉积盆地周缘, 一般由山口延伸至湖盆中部, 并终止于湖泊、风成沙丘、轴向河流等 (Hartley *et al.*, 2005, 2010)。在干旱地区发育的分支河流体系规模往往较大, 可形成大型油气储集层 (吴胜和等, 2016), 因此干旱型分支河流体系一直是国内外学者关注和研究的热点领域之一 (Clarke *et al.*, 2010; 吴胜和等, 2012, 2016; 蒋平等, 2013; 陈欢庆等, 2015; 冯文杰等, 2017a, 2017b; 季政君等, 2019)。国内外学者通过水槽沉积模拟实验、现代沉积分析、露头解剖、井震结合地下储集层研究等方式, 对干旱型分支河流体系沉积特征进行了大量研究 (Blair, 1987, 2000; Goedhart and Smith, 1998; Clarke *et al.*, 2010; 冯文杰等, 2015; Bertalan *et al.*, 2016; 吴胜和等, 2016; 印森林等, 2017; 朱一杰等, 2020), 结果表明: (1) 在外部条件恒定的条件下, 干旱型分支河流体系具有明显的多阶段演化规律, 分别为片流

阶段、非限制性水道及其末端朵体沉积阶段、限定性水道阶段，并在垂向上形成了差异显著的多层结构 (Clarke *et al.*, 2010; 印森林等, 2017), 由下到上分别为片流朵体复合体、非限制性河道与限制性河道切割叠覆体、限制性河道切叠沉积体 (吕峻岭等, 2020); (2) 干旱条件下, 分支河流体系的演化过程可概括为早期的进积作用形成椭圆形片流朵体复合体、中期进积与加积作用共存导致扇体形状不规则且地貌复杂化、晚期则形成以加积作用为主使扇体边缘平滑且形态趋于理想化的扇形 (朱一杰等, 2020); (3) 干旱型分支河流体系在平面上呈扇状, 顺物源方向可分为扇根、扇中、扇缘 3 个部分, 其中扇根主要为槽流带和片流带, 扇中以辫流带为主, 扇缘发育径流水道、漫流细粒沉积等构型要素 (Spearing, 1974; 朱筱敏, 2008; 吴胜和等, 2016; 印森林等, 2017)。

朵体是干旱型分支河流体系水道末端形成的由分散状水体控制的朵状沉积体 (朱一杰等, 2020)。作为干旱型分支河流体系的基本构型之一, 朵体是组成分支河流体系的重要单元, 其沉

积演化对分支河流体系的形成发育具有重要意义。朵体与河道及由河道构成的河网共同组成了分支河流体系的主要结构。在分支河流体系的演化过程中, 不仅会发育单个的朵体, 而且不同朵体之间还相互叠置形成更为复杂的复合体 (图 1)。因此, 深入研究朵体的发育过程及其构型特征, 对于理解干旱型分支河流体系具有极其重要的科学意义。然而, 以往对朵体的研究多依赖于野外露头、现代沉积以及地下沉积记录等“静态”的地质资料 (李新坡等, 2006, 2007; Fisher *et al.*, 2007a, 2007b; 余宽宏等, 2015; 刘大卫等, 2018; 李相博等, 2021), 导致难以全面掌握朵体长期的连续演变过程与特征。为了克服这一局限性, 进一步揭示朵体在分支河流体系沉积过程中的作用机制, 笔者采用水槽实验的方法模拟干旱型分支河流体系的发育与形成过程。通过实验, 不仅可以更直观地观察到朵体的沉积过程, 而且还能对其内部结构进行更为精细的分析, 从而实现对朵体沉积构型的定量解析。

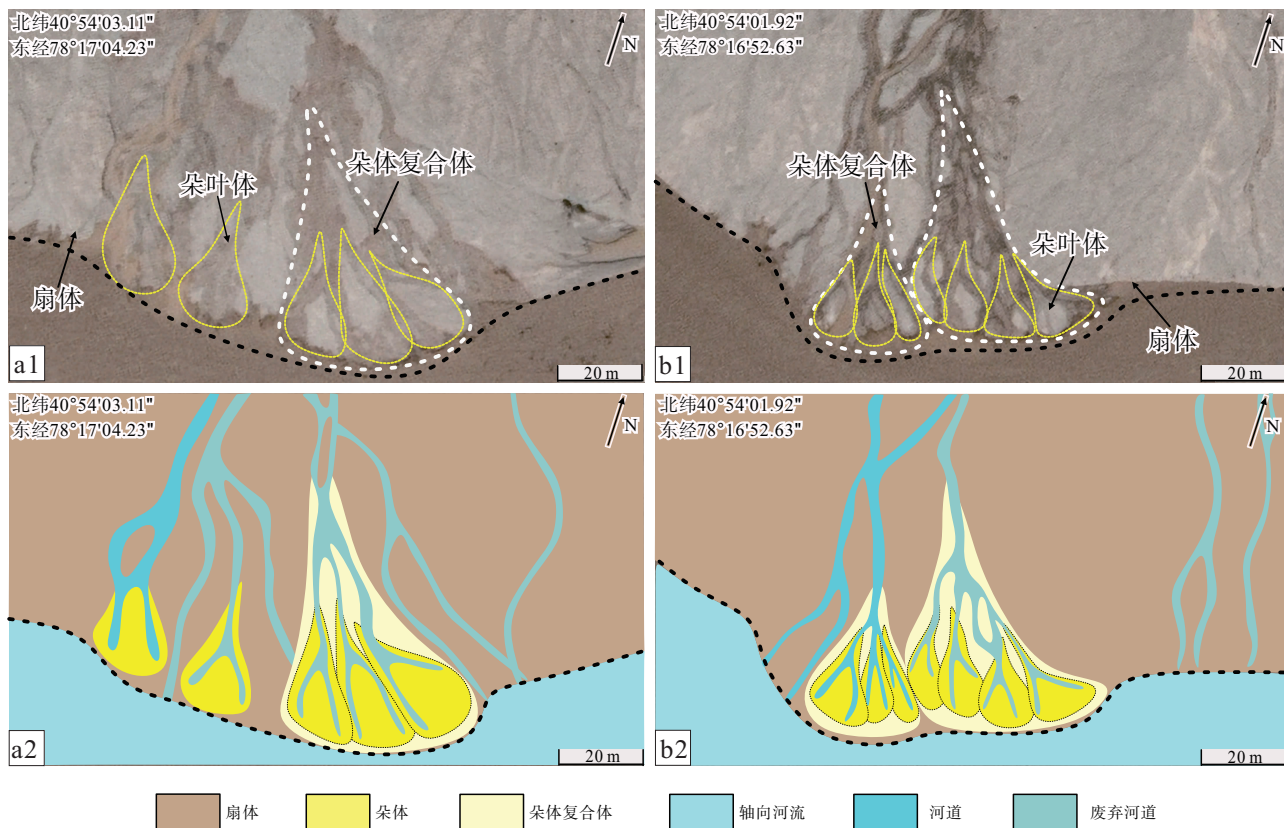


图 1 现代分支河流体系沉积中的朵体 (卫星图来源于 Google Earth)

Fig. 1 Lobes deposits in the modern arid distributive fluvial system (the satellite image from Google Earth)

1 研究方法及方案设计

1.1 实验原则、设备及方案设计

为模拟自然界中干旱条件下分支河流体系的沉积演化过程,本实验在设计初始条件时遵循了以下原则:(1) 确保水流和沉积物供应的稳定性,以排除构造运动、气候变化以及物源变化等因素对实验结果的潜在干扰;(2) 设置一个水平的沉积底形,旨在消除地形起伏对分支河流体系沉积模式的影响,从而观察其在平坦底面上的自然沉积演化过程;(3) 考虑到水槽实验条件下水流搬运能力的局限性,选择分选良好的中砂来模拟自然界中干旱型分支河流体系(DFS)的沉积物,所使用的砂样中泥质含量极低,几乎无黏性,这使得模拟实验体本质上表现为一个偏砂质的扇体,与干旱气候条件下扇面植被覆盖度较低、沉积物含泥量少的 DFS 高度相似。通过这种方式,本实验旨在探索在外部条件保持恒定的情况下,干旱型分支河流体系自发演化过程中发育的朵体沉积构型及其特征。

基于上述原则,本实验参考了先前关于分支河流体系模拟实验的研究成果(冯文杰等, 2017b; 吕峻岭等, 2020; 朱一杰等, 2020),并结合多次预实验的数据,确定本次水槽实验采用的实验参数(表 1)。实验在长江大学 CNPC 沉积水槽模拟实验室进行,实验过程中使用了一个长 4 m、宽 3 m 的大型水槽作为实验平台。水槽内部预先铺设了 1 层沙质沉积基底,以提供分支河流体系沉积与演化的

表 1 干旱型分支河流体系水槽模拟实验的输入参数
Table 1 Input parameters of flume experiment for depositional process of arid distributive fluvial system

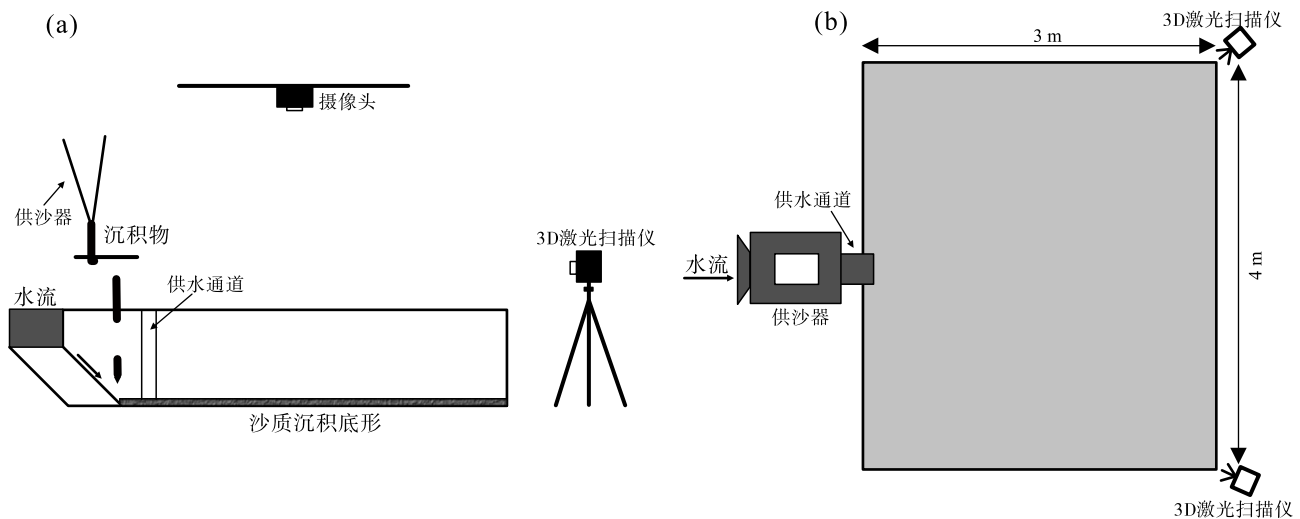
参数项	输入参数
沉积物粒度中值/mm	0.35
底床坡度/(°)	0
底形高程/m	0.715
流速/ $m \cdot s^{-1}$	0.1
流量/ $L \cdot s^{-1}$	0.1
水体密度/ $kg \cdot m^{-3}$	1000
供砂速率/ $cm^3 \cdot min^{-1}$	160
模拟时间/min	1275

基础环境。实验装置包括位于水槽上游的供水器和供沙器,它们以恒定速率向水槽内输送水和沉积物。

为了精确记录和分析分支河流体系的沉积演化过程,实验过程中采用了延时摄像机连续拍摄,捕捉分支河流体系的动态演变。同时,利用高精度 3D 激光扫描仪(型号 FARO S70)对沉积地貌进行了详尽的扫描(图 2)。通过这些先进的监测技术,该实验能够获得关于干旱型分支河流体系中朵体沉积构型及其演化特征的详实数据,为后续的分析研究奠定了坚实的基础。

1.2 实验流程

本次实验基于水槽实验模拟了干旱型分支河流体系的演化过程,实验步骤如下:实验开始前,在



a—实验设备侧视图; b—实验设备俯视图

图 2 干旱条件下的分支河流体系演化的水槽沉积模拟实验设备简图

Fig. 2 Flume experimental equipment sketch for sedimentary evolution of arid distributive fluvial system

水槽实验装置内铺设底床并用水浸没，排水后静置 1 周，使得底床稳定。实验中，以 15 min 为 1 个周期，以稳定的供水速率 (0.1 L/s) 和供沙速率 (160 cm³/min) 向水槽内供给沉积物，同时利用延时摄像机开展分支河流体系沉积演化过程监测和数据采集；每隔 15 min 暂停实验，排出槽内积水，利用 3D 激光扫描仪对沉积地貌进行激光扫描，采集不同时期分支河流体系的沉积地貌及高程等数据。实验共进行了 85 个周期，形成了一个与自然界干旱型分支河流体系相似的实验沉积体 (长 2.4 m、宽 3.1 m)。实验结束后，对实验数据进行处理，利用自主编写的 Matlab 程序开展沉积过程定量解析，分析沉积特征并解剖沉积构型，获得实验过程中每一个周期的沉积增量图和 DEM 高程图，并在此基础上研究干旱型分支河流体系的沉积演化过程。

2 干旱型分支河流体系生长演化过程

在实验的初始阶段，通过供水渠道直接将水流引入水槽，沉积物随水流进入水槽并在开阔地形上扩散，逐渐累积形成一个表面完全被水覆盖的小扇体，即片流朵体。此过程主要发生在实验初始阶段 (实验第 0~150 min)，主要为片流沉积 (图 3-a1, 3-b1)。随着实验的继续推进 (实验第 150~1275 min)，扇体迅速向周围扩展，扇体面积显著增加；由于扇体的快速扩张，水体不再能够覆盖整个扇体，扇体表面逐渐出露，开始出现水道此时扇体主要受到河流迁移活动和河道末端朵体沉积的控制 (图 3-a2 至图 3-a9, 图 3-b2 至图 3-b9)。这一时期朵体沉积逐渐成为干旱型分支河流体系沉积演化的核心环节，具体表现为沉积物被河流从上游运送至下游扇体边缘的开阔地带并沉积下来形成朵体，扩大扇体面积。朵体与河流形成的网络构成了干旱型分支河流体系的基本架构，因此对朵体沉积演化的研究，对揭示干旱型分支河流体系的复杂动态过程有极其重要的意义。

3 朵体的分类及其生长演化过程

在本次模拟实验中发现，在干旱型分支河流体系的演化过程中，朵体在大多数情况下并不是单一的朵状沉积物，而是以由多个朵状沉积物组成的复合体形式存在。根据实验过程中朵体的沉积方式，

可以将朵体划分成侧积型、摆动型和加积型 3 种类型。其中侧积型表现为水道逐步横向迁移，沉积物侧向加积；摆动型表现为水道无序摆动，沉积物叠加较为随机；加积型表现为水道迁移受限，沉积物垂向加积 (图 4)。

3.1 侧积型朵体生长演化过程

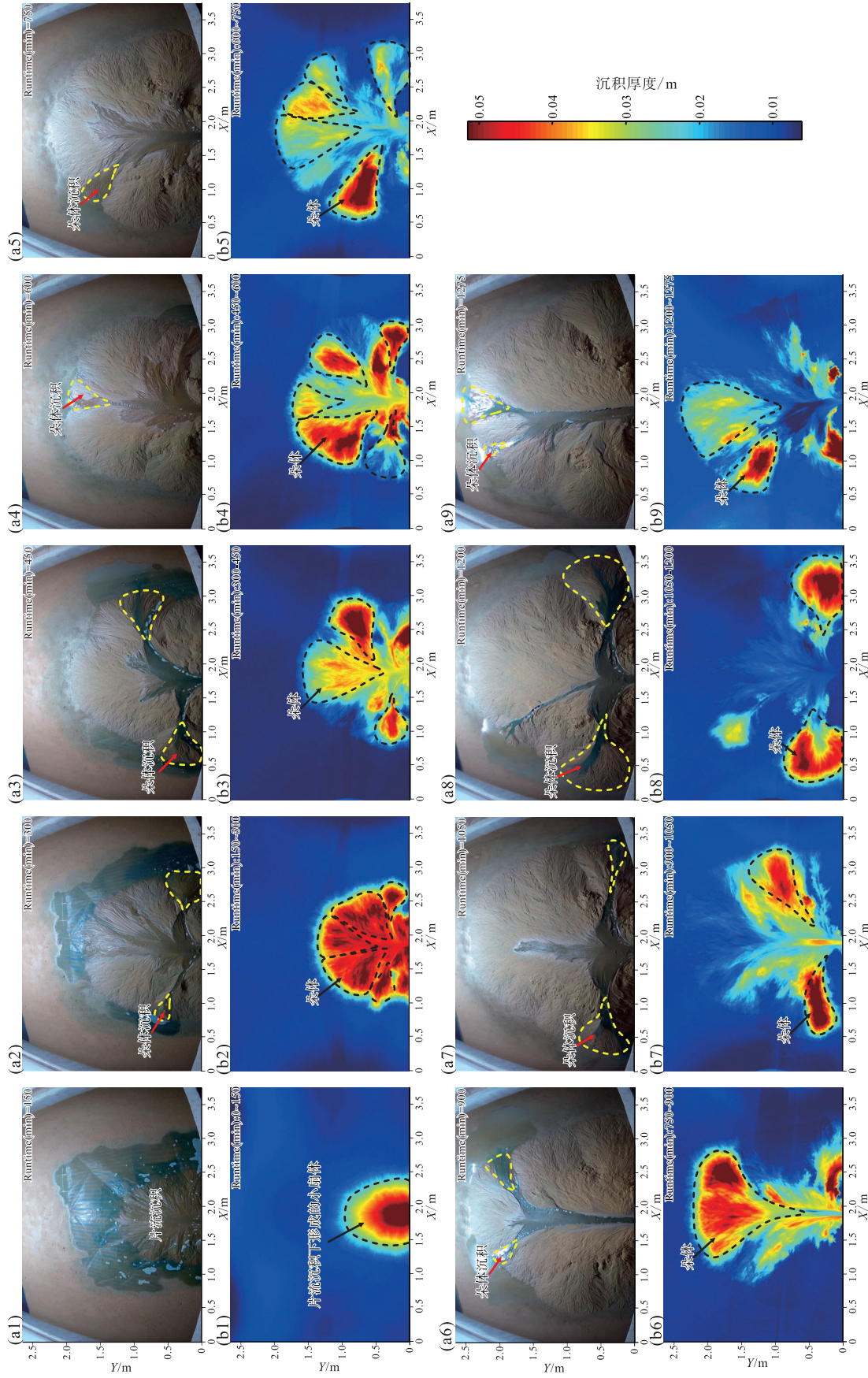
侧积型朵体是由于水道沿扇体边缘逐步横向迁移导致沉积物互相叠置而形成的复合体。起初，沉积物经水道从上游被输送到扇体的侧缘进行沉积，形成第 1 期的朵体 (实验第 225~240 min)；随后，水道开始向扇根方向迁移，受控于水道的迁移，沉积物的沉积位置也向扇根方向移动，形成第 2 期的朵体 (实验第 240~255 min)。因此，与第 1 期朵体相比，第 2 期朵体的形成位置明显向左、即更靠近扇根方向偏移。随着实验的继续进行，水道不断向扇根方向迁移 (实验第 255~285 min)。在这一过程中，每一期新形成的朵体都位于上一期朵体的左侧 (图 5)。

在侧积型朵体的形成过程中，地形至关重要。由于早期的沉积作用，已形成了一个缓坡和一个陡坡相结合的地貌，这样的地形为沉积物的侧向迁移提供了有效的限制。在这种环境下，沉积物倾向于在地形较陡峭的一侧，即地形的最低点处堆积，因此第 1 期沉积物会在陡坡处形成。当第 1 期沉积物形成后，它与原有的缓坡一起形成了新的陡坡和平缓坡面的组合。值得注意的是，与沉积初期相比，新的陡坡位置已经显著地向原来的缓坡方向移动。这一变动促使了下一个地形低点，即下一期沉积物的沉积位置，向侧向约束较小的缓坡方向迁移。随着这一过程的循环发生，每一期新形成的沉积物都会沿着缓坡方向逐步迁移，形成一系列逐渐向同一方向偏移的沉积层。这一系列的沉积活动最终呈现为沉积物沿着特定方向逐步横向迁移的沉积模式 (图 6-a, 6-c)。

对侧积型朵体形成过程中的坡度变化进行测量，发现朵体开始形成时的坡度为 18.93°，而朵体发育完成时坡度降为 18.11°。在整个朵体的生长演化过程中，坡度的变化并不显著 (图 6-b)。

3.2 摆动型朵体生长演化过程

摆动型朵体是由于水道沿扇体边缘无序摆动导致沉积物间互相叠置而形成的复合体。起初，水道



a1-a9; 实验过程中分支河流体系生长演化过程中的沉积量分布。X轴为水槽宽度方向, Y轴为水槽长度方向
 b1-b9; 实验过程中分支河流体系生长演化过程中的沉积量分布。X轴为水槽宽度方向, Y轴为水槽长度方向

图 3 干旱型分支河流体系生长演化的水槽沉积模拟实验结果

Fig. 3 Flume experimental results of growth and evolution of arid distributive fluvial systems

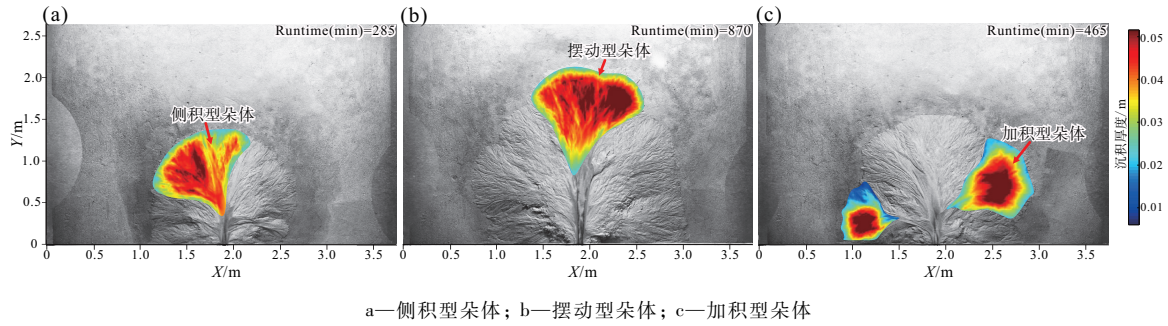
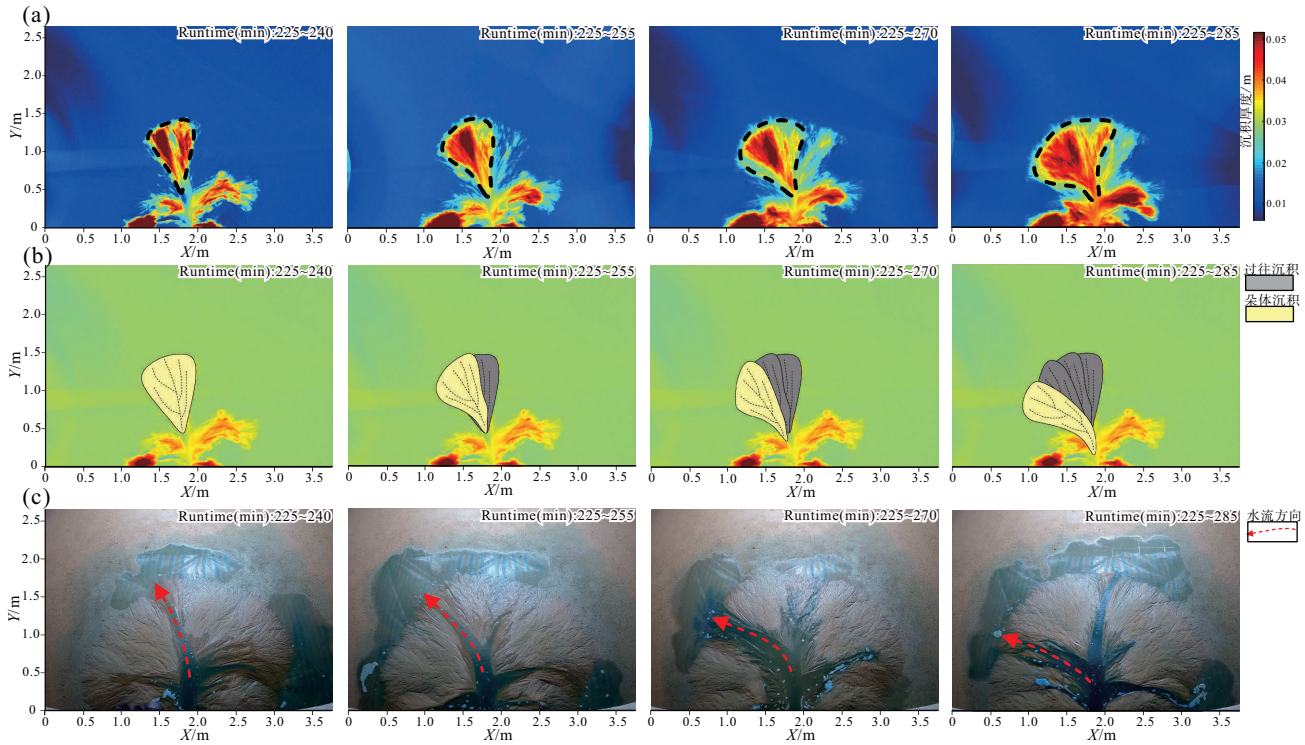


图 4 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中形成的 3 种类型朵体

Fig. 4 Three types of lobes formed in flume experiment of arid distributive fluvial systems



a—侧积型朵体生长发育沉积增量；b—侧积型朵体生长发育过程；c—侧积型朵体生长发育过程中河流的变化

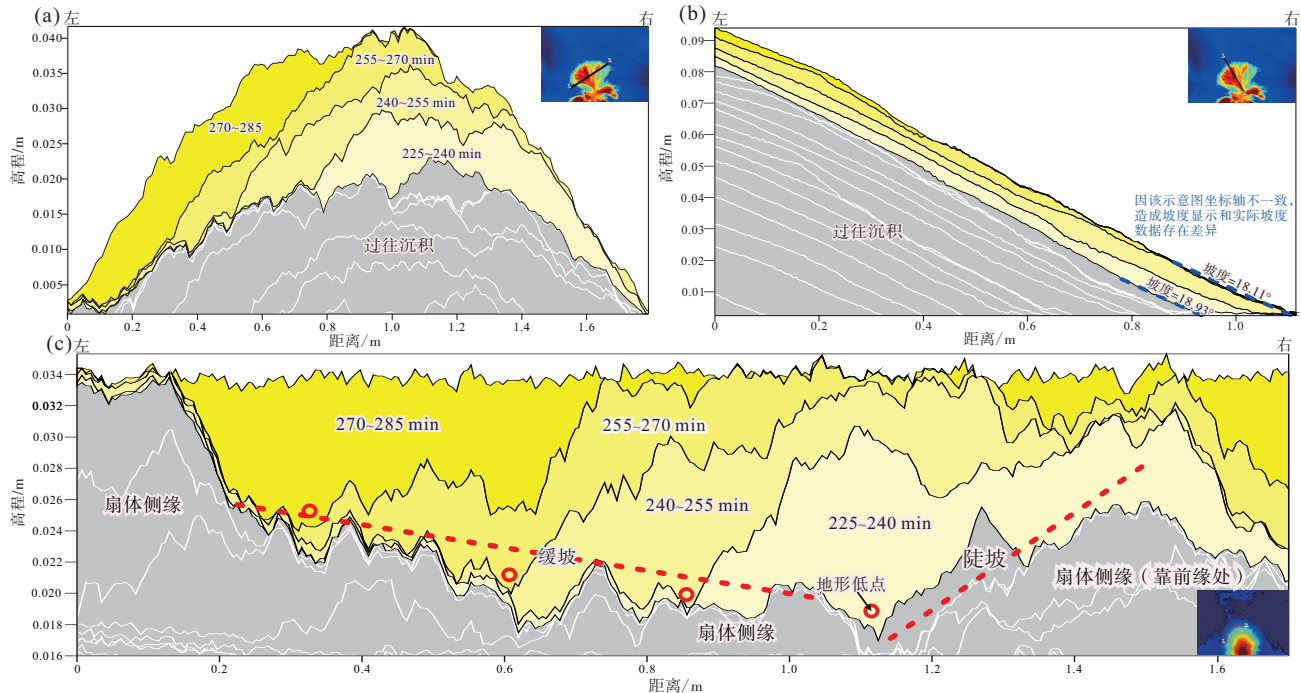
图 5 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中第 225~285 min 的侧积型朵体生长发育过程

Fig. 5 Growth and development process of lateral migration lobe during 225~285 min in flume experiment of arid distributive fluvial systems

在上游下切，将沉积物运送至扇体前缘，形成第 1 期的朵体（第 825~840 min）。随后，水道开始向左侧迁移（第 840~855 min），导致沉积物的沉积位置也随之向左侧移动，形成第 2 期朵体。与第 1 期相比，第 2 期朵体表现出明显的向左偏移。随着实验的进一步进行，水道的迁移方向发生改变，向右侧移动（第 855~870 min），导致沉积物沉积位置转向右侧，形成第 3 期朵体（图 7）。

在摆动型朵体的形成过程中，通常地形较为平缓 and 开阔，侧向约束力较弱，这表明单个沉积物的

堆积更多地受到沉积过程本身的影响，而不是地形的主导。具体来说，沉积物倾向于在地形的低洼区域优先沉积，当第 1 期朵体形成后，它在原本平坦的地面上创造了局部的高低地形，为后续沉积提供了新的沉积点。随着水道的迁移，沉积物开始在新形成的局部低点处沉积，形成第 2 期沉积物，沉积位置直接受到第 1 期沉积物的影响，倾向于在第 1 期沉积物形成的地形低点处堆积。第 2 期沉积物形成之后，地形再次发生变化，产生新的局部高低地形，再次影响下一期沉积物，使其沉积于新的地形



a—侧积型朵体垂直物源方向剖面；b—侧积型朵体顺物源方向剖面；c—侧积型朵体沿地层走向的剖面

图 6 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中的侧积型朵体内部构型

Fig. 6 Internal conformation of lateral migration lobe in flume experiment of arid distributive fluvial systems

低点中 (图 8-c)。水道的摆动和地形的变化复杂互动, 导致沉积物间的叠加关系显得较为随机, 呈现出一种无序摆动的沉积模式, 例如沉积物可能先是向初期沉积物的左侧沉积, 然后又向初期沉积物的右侧沉积 (图 8-a, 8-c)。这种无序的沉积模式准确地反映出水道迁移和地形变化之间错综复杂的相互作用。

从顺物源方向的剖面来看, 摆动型朵体与侧积型朵体极为相似, 朵体开始形成时坡度为 18.43° , 而朵体发育完成时坡度为 18.08° , 坡度差仅为 0.35° (图 8-b)。在整个朵体的生长演化过程中, 坡度变化非常微小, 几乎可以忽略不计。

3.3 加积型朵体生长演化过程

加积型朵体是水道处于稳定条件下的沉积产物, 其形成过程以垂向加积作用为主导。在朵体发育初期 (第 405~420 min), 上游水道将沉积物输送至扇根两侧, 形成第 1 期朵体。随后 (第 420~465 min) 水道系统呈现高度空间稳定性, 活动范围高度受限, 横向迁移幅度微弱, 导致沉积物持续在扇根同一位置堆积, 各期朵体平面位置近乎重叠 (图 9)。

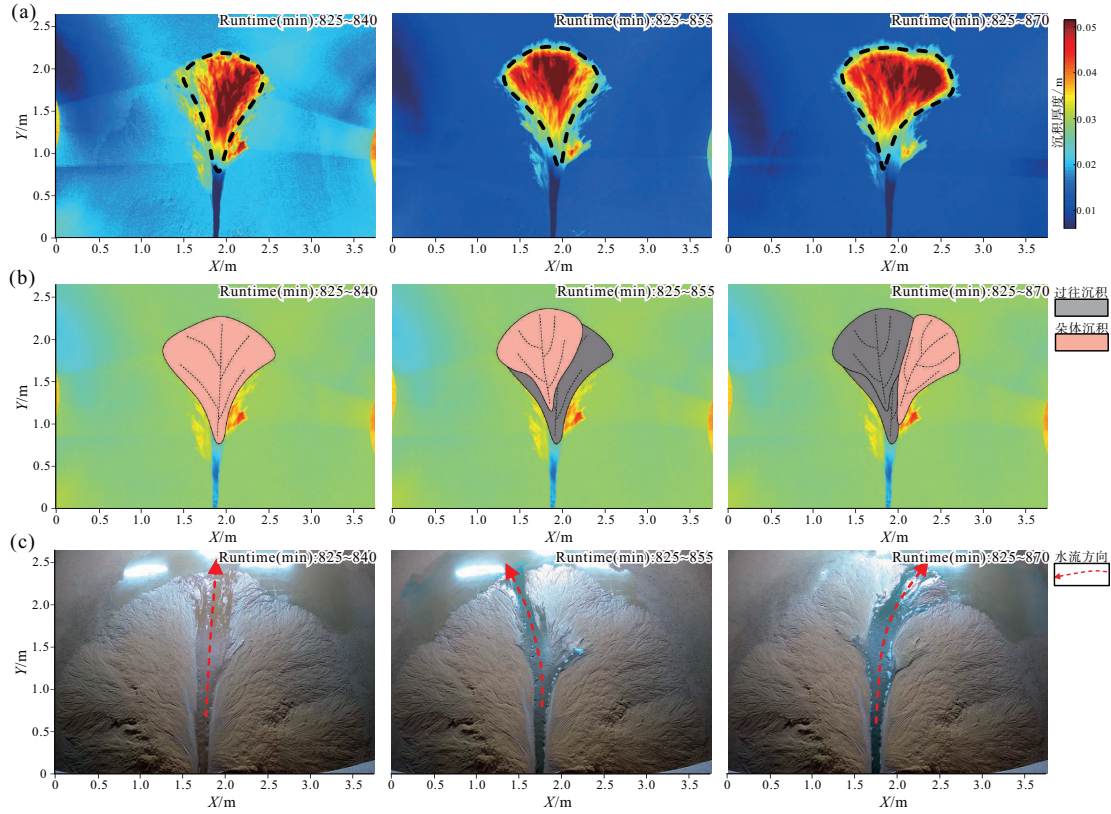
地形约束是控制加积型朵体沉积模式的关键因素。此类朵体多发育于狭窄陡坡带, 强烈的侧向限制使水道迁移能力降低 (图 10-c), 沉积物优先在地形低势能区卸载, 受空间限制无法侧向扩展, 致每一期的沉积物不断地覆盖在先前沉积物之上, 最终形成垂向叠置结构 (图 10-a)。

观察顺物源方向上的剖面, 可以发现加积型朵体与侧积型朵体及摆动型朵体特征存在显著差异。测量结果显示, 加积型朵体开始形成时的坡度为 18.56° , 而当其发育完成时坡度降低到 16.45° , (图 10-b), 坡度变化明显。

4 朵体的分布规律及沉积特征

4.1 不同类型朵体的分布规律

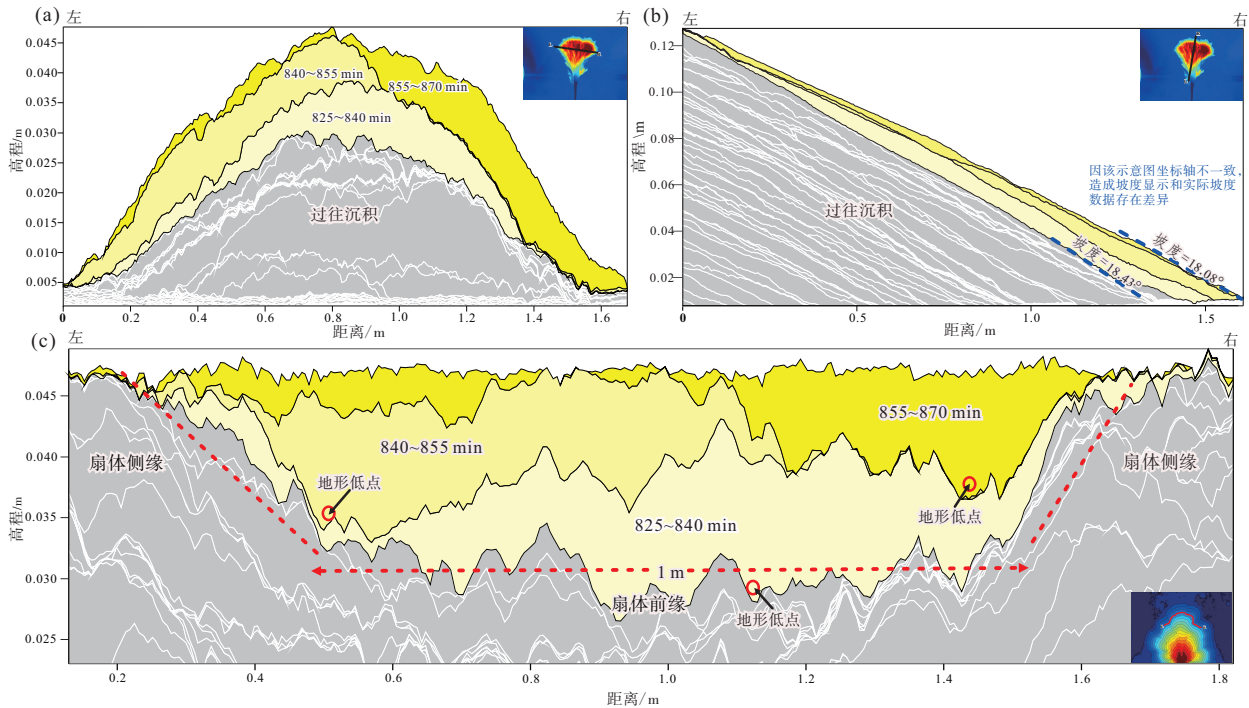
通过对本次实验中发育的不同类型朵体的观察, 发现它们分别分布在扇体的不同部位且表现出特定的沉积模式。摆动型朵体主要发育于扇体前缘, 此处水流能量较高, 地势较为平坦, 侧向约束较弱, 有利于水道的自由摆动, 故沉积物倾向于较为无序随机地堆叠。侧积型朵体则大多聚集在扇体侧缘, 这些区域的水道受到地形的侧向约束, 沉积



a—摆动型朵体的生长发育沉积增量图；b—摆动型朵体生长发育过程；c—摆动型朵体生长发育过程中河流的变化

图 7 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中第 825~870 min 的摆动型朵体生长发育过程

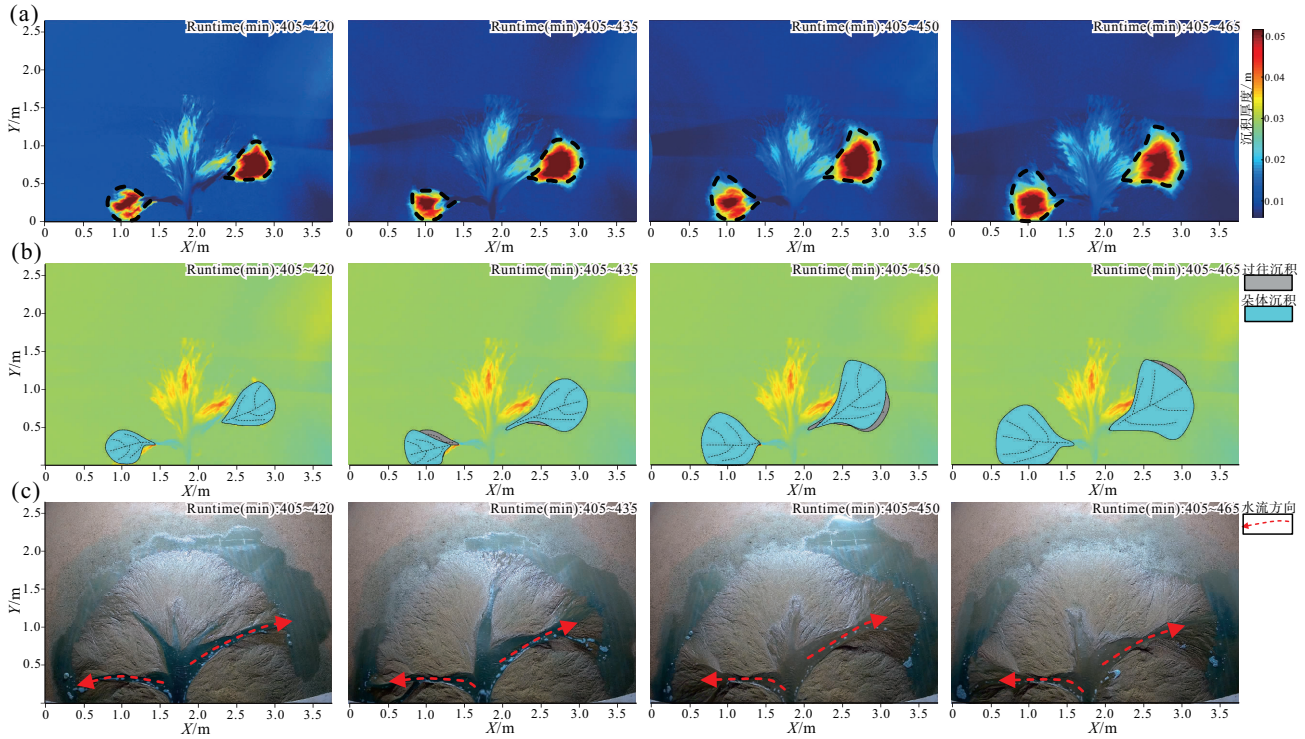
Fig. 7 Growth and development process of swinging lobe during 825~870 min in flume experiment of arid distributive fluvial systems



a—摆动型朵体垂直物源方向剖面；b—摆动型朵体顺物源方向剖面；c—加积型朵体沿地层走向的剖面

图 8 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中的摆动型朵体内部构型

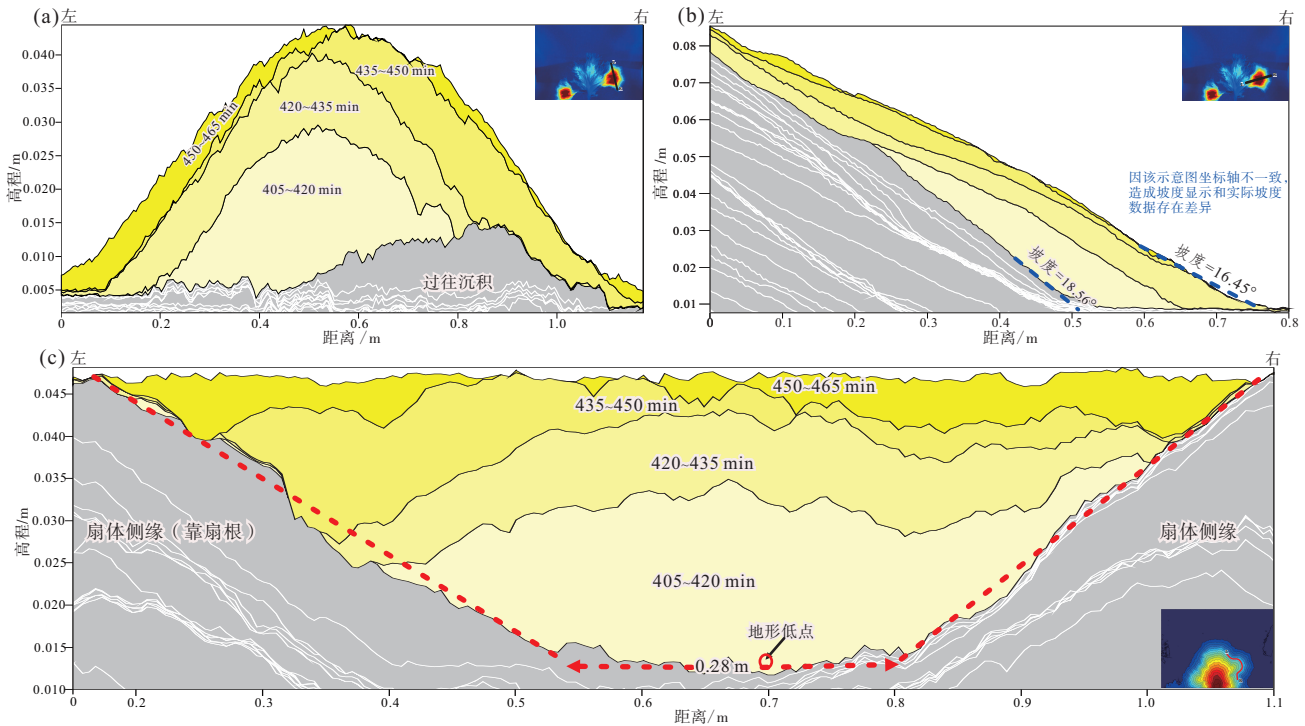
Fig. 8 Internal conformation of swinging lobe in flume experiment of arid distributive fluvial systems



a—加积型垂体生长发育过程沉积增量图；b—加积型垂体生长发育过程；c—加积型垂体发育过程中河流的变化

图9 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中第405~465 min的加积型垂体及其生长演化

Fig. 9 Growth and development process of vertical accretion lobe during 405~465 min in flume experiment of arid distributive fluvial systems



a—加积型垂体垂直物源方向剖面；b—加积型垂体顺物源方向剖面；c—加积型垂体沿地层走向的剖面

图10 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中的加积型垂体内部构型

Fig. 10 Internal conformation of vertical accretion lobe in flume experiment of arid distributive fluvial systems

物倾向于沿侧向扩展，形成侧积结构。加积型朵体大多聚集在扇根两侧，这一区域的地形通常较为陡峭，且空间较为狭窄，限制了沉积物的横向扩展，从而形成沉积物垂向上的堆叠(图 11)。

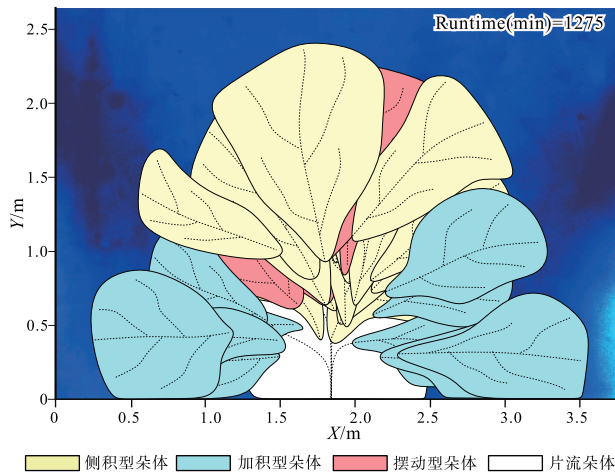


图 11 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中不同类型朵体在扇体上的分布

Fig. 11 Distribution of different types of lobes on fan body in flume experiment of arid distributive fluvial systems

4.2 不同类型朵体的沉积特征

为了理解和分析不同类型朵体的沉积特征，本研究对不同类型朵体的面积、纵向长度、横向宽度和垂向厚度进行了测量，并进一步计算了其长宽比和宽厚比。通过系统地对比这些数据，能够更清晰地揭示不同类型朵体之间的差异。

在面积、纵向长度、横向宽度方面，加积型朵体通常小于侧积型和摆动型朵体。加积型朵体面积的平均值为 0.6 m^2 ，纵向长度为 0.9 m ，横向宽度为 0.6 m 。然而，在垂向厚度上，加积型朵体具有显著的优势，平均厚度可达 0.035 m ，这表明其在垂直方向上的沉积作用更为活跃。加积型朵体主要形成于扇根区，该处地形较为陡峭、侧向空间有限、垂向空间较大，水道在横向迁移受到限制时容易产生强烈的垂向沉积，导致朵体在垂向上迅速增厚。此外，加积型朵体长宽比为 1.51 ，宽厚比为 19.56 ，平面上呈长且窄的舌形分布。

侧积型朵体面积、横向宽度和纵向长度的平均值分别为 0.65 m^2 、 1.2 m 和 1.1 m ，明显大于加积型朵体。相比之下，其垂向厚度仅为 0.02 m ，远小于加积型朵体。侧积型朵体主要在扇体侧缘发展，这些区域拥有较大的侧向可容空间，因此水道

的横向迁移较为活跃，有助于沉积物的横向扩展，这导致其在垂向上的沉积较少，具有面积较大但厚度较小的特点。侧积型朵体的长宽比平均值为 1.29 ，宽厚比平均值为 47.85 ，沉积物之间以边缘部分相互叠加，整体平面形态呈扇形。

摆动型朵体的面积、横向宽度和纵向长度分别为 0.75 m^2 、 1.3 m 和 1.2 m ，同样大于加积型朵体，平均厚度为 0.02 m ，与侧积型朵体相似。摆动型朵体通常形成于扇体前缘，此处侧向空间较大，水道的横向迁移非常活跃，这有利于沉积物在横向上的扩展；与侧积型朵体类似，垂向沉积较少，厚度也较小。摆动型朵体的长宽比平均值为 1.05 ，宽厚比平均值为 55.63 ，沉积物之间以边缘部分相互叠加，呈现出扇形的平面形态(图 11；图 12)。

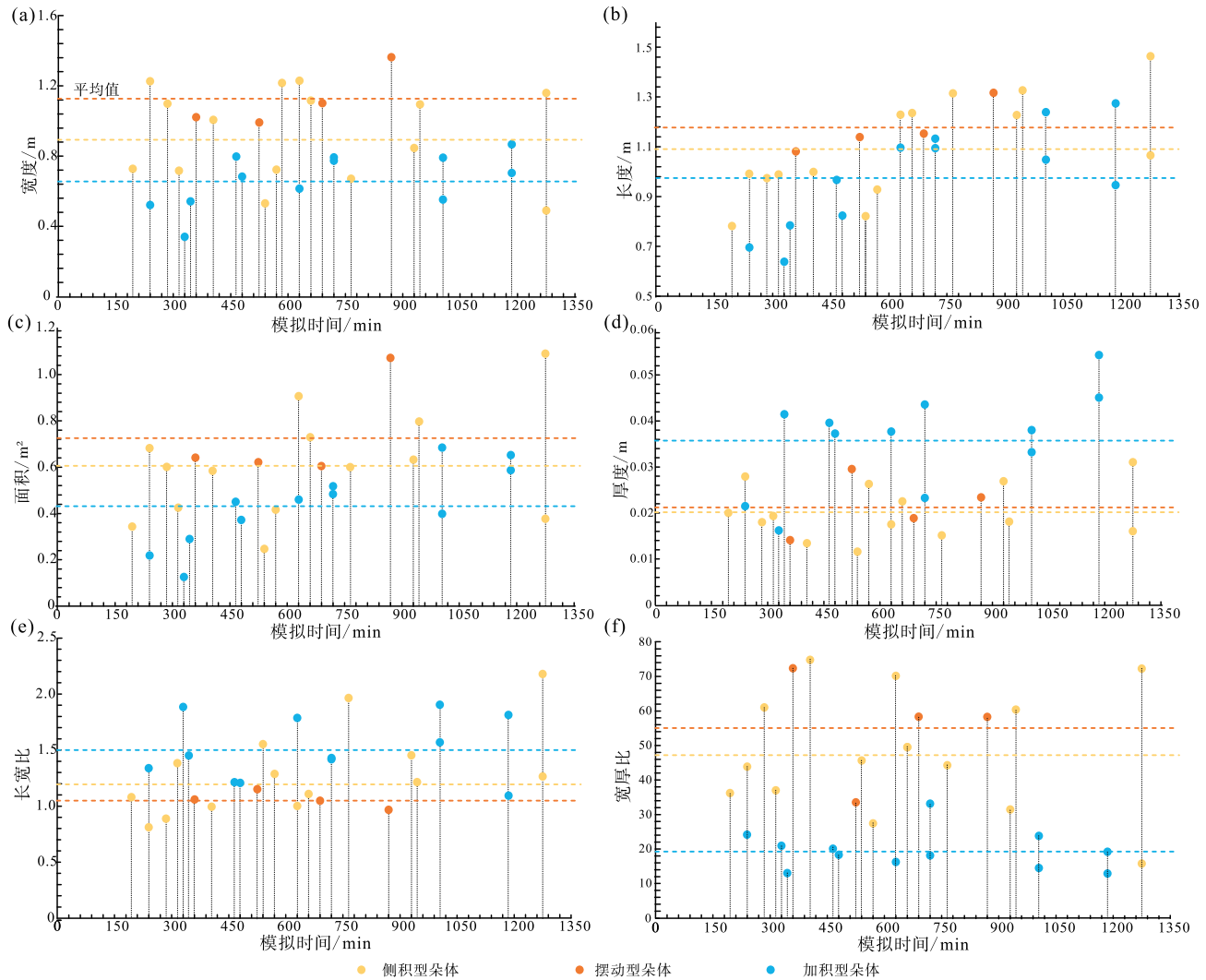
4.3 自旋回过程

在实验过程中，笔者对分支河流体系的演化进行了深入观察，发现在实验的不同阶段，该沉积体系的行为模式存在显著变化。

实验初期(第 $165 \sim 360 \text{ min}$)，整个扇面的地形相对平坦，地形差异较小，在这样的条件下，分支河流体系展现出高度规律的自旋回特征，类似于三角洲河口坝的发育(王俊辉等, 2013; Wang *et al.*, 2015)。具体来说，水道首先集中在扇体前缘活动，卸载沉积物；随后，这些水道开始向扇体两侧迁移，通过这种迁移活动形成典型的侧积型朵体，这一过程可以视为一个自旋回循环的开始；随着时间的推移，水道继续向扇体的边缘迁移，最终到达扇根两侧，沉积物堆叠形成加积型朵体，标志着—个完整的自旋回循环的完成。之后，水道会再次回到扇体前缘，开始新的自旋回循环(图 13-a, 13-b)。

然而，随着实验的进行(第 $315 \sim 525 \text{ min}$)，扇体表面地形差异因沉积物空间分配不均而持续增大。地形分异度的加大强化了重力势能对水道活动的控制作用，致使自旋回模式的规律性显著降低(图 13-c)。此阶段水道结束扇根两侧沉积后，未按早期规律返回扇体前缘，而是转向扇体侧缘活动。

实验进入中后期阶段(第 $480 \sim 825 \text{ min}$)，地形差异进一步加剧，水道迁移路径呈现出更高的复杂性。初期水道自扇体右侧向扇体前缘迁移，抵达



a—不同类型朵体的宽度；b—不同类型朵体的长度；c—不同类型朵体的面积；d—不同类型朵体的厚度；e—不同类型朵体的长宽比；
f—不同类型朵体的宽厚比

图 12 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中不同类型朵体形态特征定量统计

Fig. 12 Quantitative statistics of morphological characteristics of different types of lobbies
in flume experiment of arid distributive fluvial systems

前缘后一部分水道转向扇体左侧并延伸至扇根，另一部分则从前缘左侧反向迁移至右侧。由于扇体右侧已被前期沉积体占据，该区域不具备沉积物卸载的条件，水道直接跨越右侧区域在扇根处沉积（图 13-d）。与此同时，扇体前缘开始出现水道沉积活动，且扇根沉积活动继续；当扇根附近沉积趋于停滞时，水道迁移至扇体侧缘，并从靠近前缘的区域向靠近扇根的区域逐步迁移，最后随着扇体侧缘水道沉积活动的消失，水道重新出现于扇体前缘（图 13-e）。此阶段虽保留自旋回过程的基本特征，但其规律性与可预测性较早期显著弱化。

至实验末期（第 825~1275 min），由于上一阶段沉积活动的影响，扇面地形的差异开始减小，这是因为沉积物在不同区域的重新分配具有填平补齐的效果，使得扇面的整体地形趋于平坦。在这种情况下，自旋回过程的规律性得到了一定程度的恢复。在此期间，分支河流体系的自旋回特征变得突出，显示出高度的规律性，即水道首先在扇体前缘活动，形成摆动型朵体；然后逐步向扇体两侧迁移，形成侧积型朵体；随着时间的进一步推移，水道再次迁移至扇根两侧，形成加积型朵体（图 13-f；图 14）。

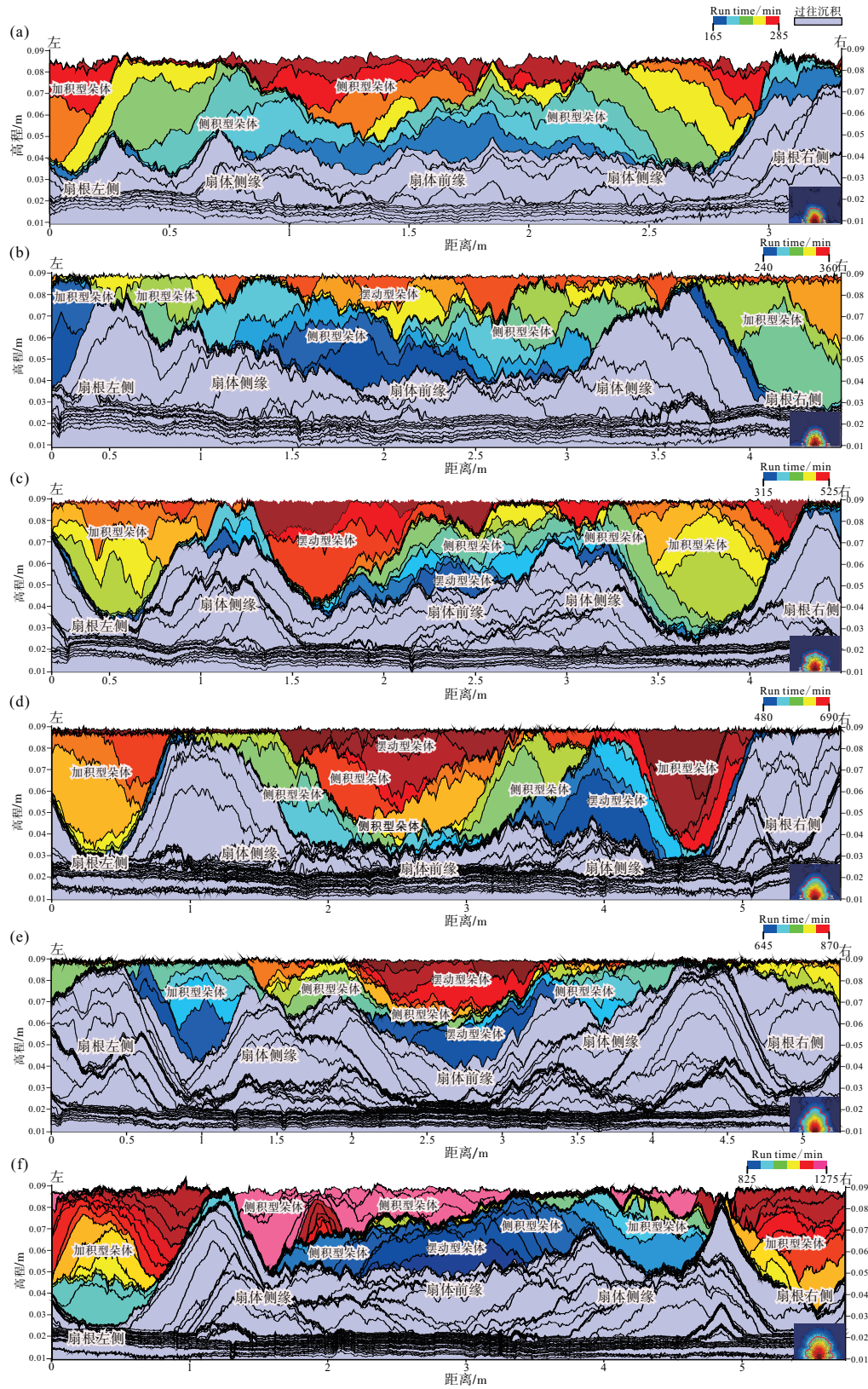


图 13 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验不同阶段根据扇面地形等高线进行的环形切片

Fig. 13 Circular slices based on contour lines of fan surface at different periods in flume experiment of arid distributive fluvial systems

根据上述实验结果可知，分支河流体系的演化并非始终遵循固定不变的模式，而是随着实验条件的改变，特别是地形差异的变化，表现出不同的行为特征。在实验初期，水道呈现出高度规律性的迁移模式，即从扇体前缘向两侧迁移，随后再回归至前缘，形成稳定的循环；进入中后期后，这种规律性逐渐减弱，水道迁移模式变得更为复杂和不可预测；到末期，水道迁移的规律性再度出现。这一过程反映出自然环境中分支河流体系也具有复杂多变的动态特性。

5 讨论

5.1 朵体的发育模式

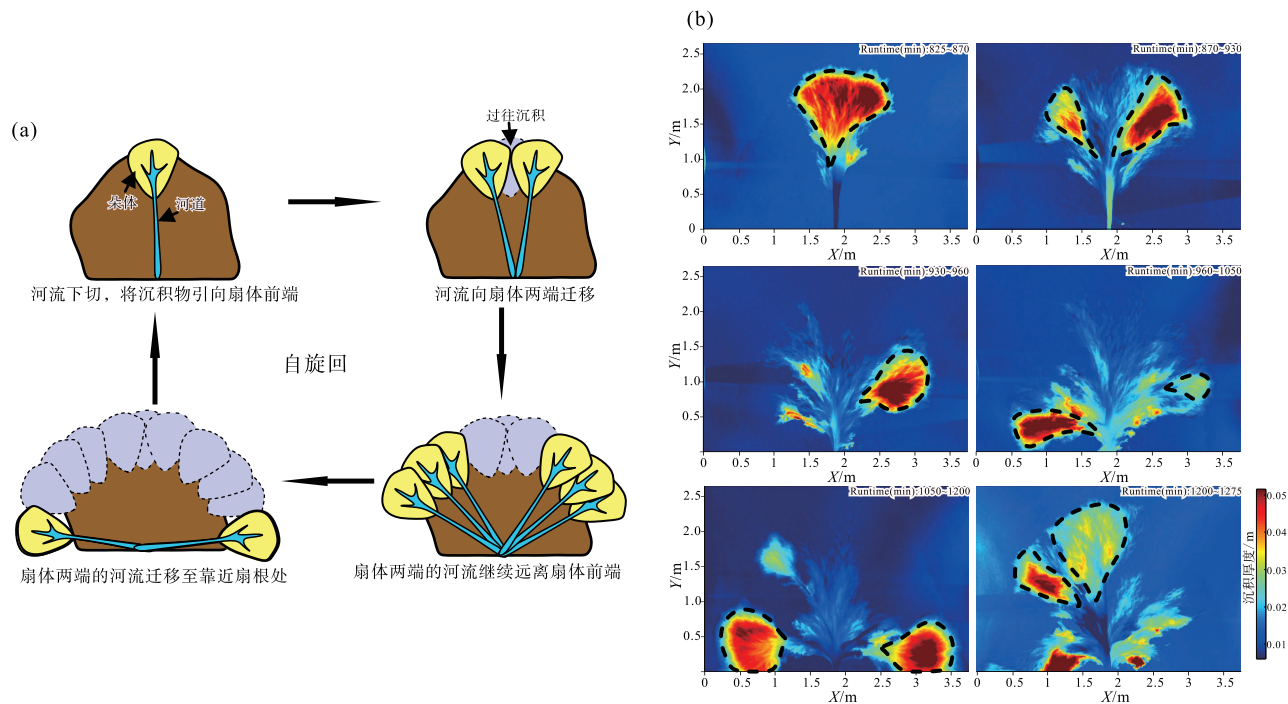
本研究通过水槽实验再现了干旱型分支河流体系中朵体完整的演化过程，同时定量描述了其沉积特征，并剖析了其内部结构。整体上看，朵体的形成不仅是水道活动的结果，也是地形演变和持续沉积活动共同作用的产物。根据水道演化特征以及沉积物堆叠样式，建立了侧积型、摆动型和加积型 3 种类型朵体的发育模式(图 15)。

侧积型朵体主要发育于扇体侧缘，受单侧地形

约束（陡—缓坡组合）控制，水道沿缓坡方向定向迁移，朵体沿水平方向侧向叠加。此类模式与准噶尔盆地克下组冲积扇片流相朵体复合体（冯文杰等，2017a；图 16）及前人对侧向迁移补偿叠加模式的描述（Zhang *et al.*, 2016）高度吻合。本实验进一步揭示了地形梯度对迁移路径的定向控制机制：陡坡侧的地形障壁限制水流扩散，迫使沉积物沿缓坡侧优先堆积(图 6-c)，形成侧向连续性强的扇缘储集层单元(图 6-a)。

摆动型朵体发育于扇体前缘低约束地形区，水道受早期朵体沉积形成的局部低洼地形引导，呈现出随机迁移特征。此模式与准噶尔盆地克下组片流相朵体复合体（冯文杰等，2017a）及无序迁移补偿模式（Zhang *et al.*, 2016）具有相似性。实验表明，此类朵体的形成依赖于“沉积—地形—再沉积”正反馈机制：早期朵体堆积产生微地形起伏，后续水流优先向低势能区迁移(图 8-c)，最终形成沉积堆叠关系较为无序的储层构型(图 8-a)。

加积型朵体发育于扇根强约束地形区（狭窄陡坡带），受两侧地形限制，水道迁移能力弱，沉积物以垂向叠置为主。此模式与进—退积补偿叠加模式（Zhang *et al.*, 2016）部分相似。本实验进一



a—自旋回过程示意图；b—自旋回过程(第 825~1275 min 沉积增量变化)

图 14 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中的自旋回过程

Fig. 14 Autogenetic cyclic process in flume experiment of arid distributive fluvial systems

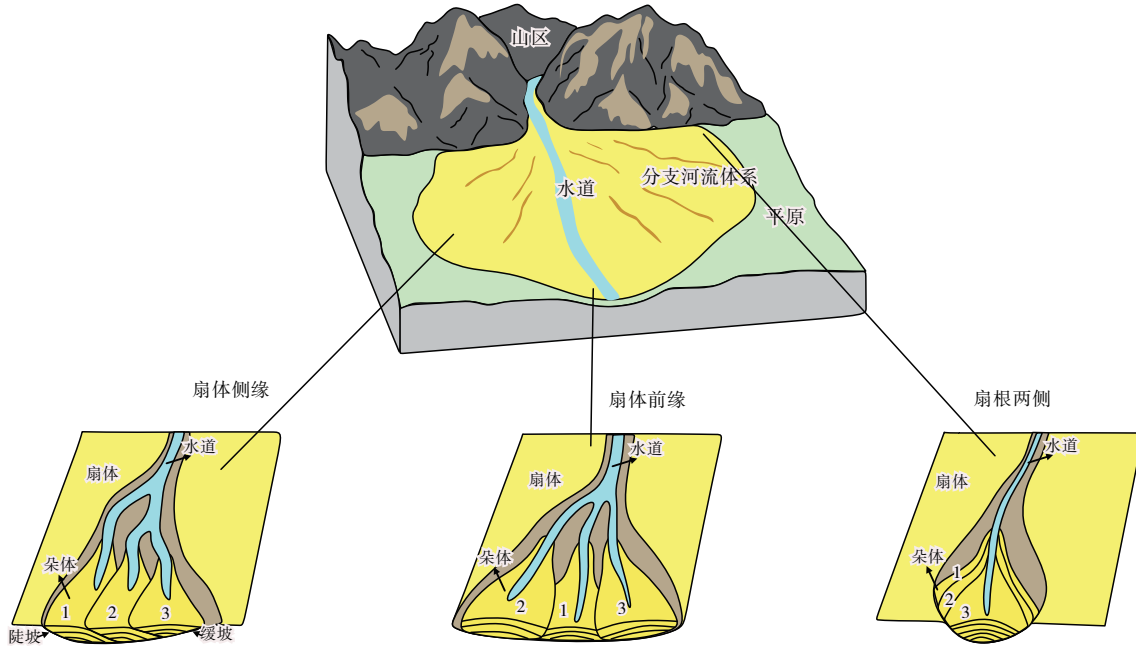


图 15 干旱型分支河流体系中的朵体发育模式

Fig. 15 Development model of lobes in arid distributive fluvial system

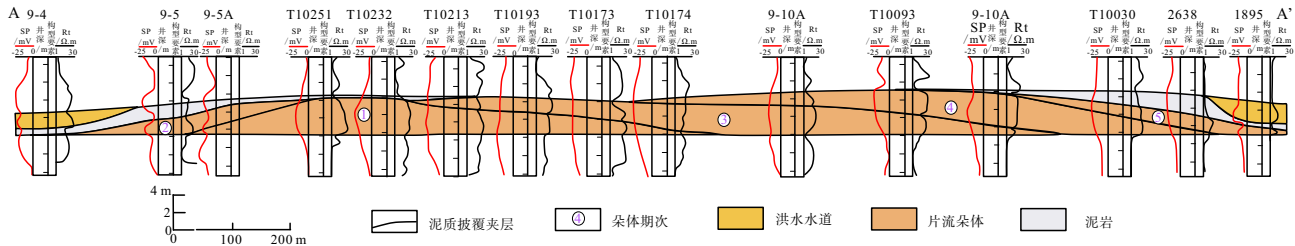


图 16 准噶尔盆地西北缘克拉玛依油田克拉玛依组 S_7^{3-3} 单层切物源片流带剖面图 (据冯文杰等, 2017a)

Fig. 16 Transverse section of sheet-flooding belt in single layer S_7^{3-3} of the Karamay Formation in Karamay oilfield, northwestern margin of Junggar Basin (after Feng *et al.*, 2017a)

步揭示了地形空间限制对垂向加积的强化作用：狭窄可容空间迫使沉积物持续垂向堆积(图 10-c)，形成垂向连通性好的扇根砂体(图 10-a)。

5.2 自旋回与水动力-地形-沉积耦合效应

本实验揭示了干旱型分支河流体系 (DFS) 中朵体形成的核心动力学机制，即水动力-地形-沉积作用的动态耦合系统。实验观测到的自旋回过程 (水道下切→朵体前积→侧向迁移→溯源迁移→再次下切) 与 Clarke 等 (2010) 提出的自旋回模型高度吻合，具体表现为：朵体前缘快速沉积导致局部地形抬升，迫使水流向低势能区迁移，触发侧积作用；当水道迁移至扇根区域时，受实验槽壁的物理约束及前期沉积体抬升的双重影响，水道活动范

围受限，沉积物垂向加积，造成扇根坡度增加，最终引发河道再次发生下切(图 13)。

为了更好地研究自旋回过程，笔者将扇体结束在扇根附近的沉积活动作为一个周期的结束，而扇体开始在扇体前缘的沉积作为一个周期的开始，实验初期 (第 165~285 min 与第 240~315 min)，自旋回周期边界模糊，表现为前一周期尚未结束时新周期已启动；随着实验推进 (第 315 min 后)，周期边界逐渐清晰且持续时间延长(图 17-a)。进一步结合 Zhang 等 (2021) 提出的定量表征扇体地形差异方法，统计出各周期内扇体坡度变异度和地貌高程变异性，发现在实验期间扇体的坡度变异度整体上呈下降→上升→下降的动态变化趋势(图 17-a)，而地貌高程变异性呈阶梯式上升

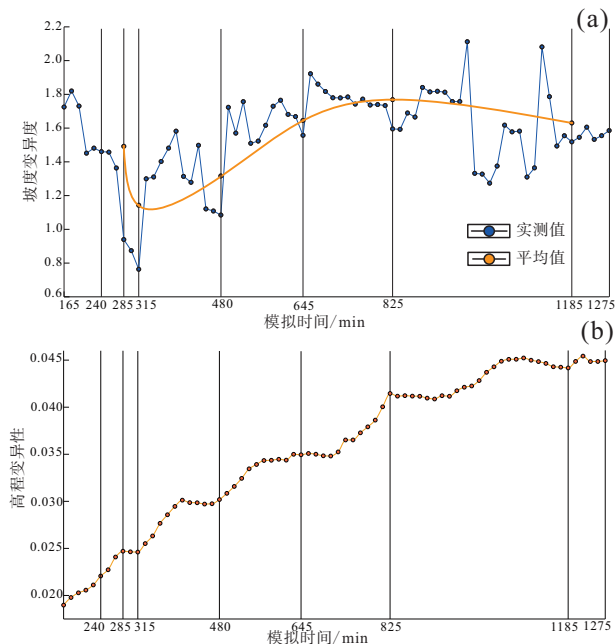


图 17 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中的扇体地貌差异的变化

Fig. 17 Variations of morphology differences in flume experiment of arid distributive fluvial systems

(图 17-b)。

为深入解析自旋回过程及其驱动机制，本研究选取第 825 ~ 1275 min 实验阶段(图 13-f)开展典型过程分析。初始阶段(第 825 min)，扇体呈现前缘坡度较低、向扇缘两侧坡度逐渐增大的地形特征。在早期演化阶段(第 825 ~ 930 min)，地形坡度变异度处于低值，水道在水动力主导下沿供水口主流方向持续下切，将沉积物稳定输送至扇体前缘堆积(图 18-b1)。随着前缘沉积体逐渐发育(第 930 min 后)，地形的改变引发水道向扇体侧缘迁移，同时导致坡度变异度逐步加大(图 18-a1)。在此过程中，重力势能对水道迁移的控制作用逐渐增强，最终取代水动力成为主导因素，驱动水道向坡度较大的扇根区域迁移。当水道迁移至扇根区域后(图 18-b2)，沉积物在该区域发生垂向加积。此时地形坡度变异度呈现下降趋势，但因扇根区显著的垂向加积作用，导致地貌高程差异持续累积(图 18-a2)。随着扇根区沉积持续发育，在低坡度变异性背景下(图 18-a1)，水动力对水道的控制作用重新增强，促使水道在前缘区域产生分流(图 18-b3)，此过程伴随坡度变异性急剧上升。随后，扇根区沉积活动减弱与前缘区沉积启动同步发生，坡度变异

性逐步回落，同时扇体整体高程差异呈现降低趋势(图 18-b2)。在末期阶段(第 1185 ~ 1275 min)，水动力重新占据主导地位，驱动水道沿供水口主流方向迁移。然而，受前期沉积形成的地形屏障及累积高程差异的影响，沉积物输运路径发生偏移，最终在扇体前缘附近的地形低点卸载(图 13-f; 图 18-b4)，标志着当前自旋回周期结束与新周期启动。这一完整的沉积动力学过程清晰地揭示出水动力-地形-沉积三元耦合机制的协同作用：水动力控制沉积物初始输运路径，地形差异通过重力势能调控水道迁移方向，而沉积作用通过地貌重塑反馈影响后续旋回演化，三者动态平衡共同塑造出干旱型分支河流体系的复杂地貌格局。

6 结论

干旱型分支河流体系的沉积过程受多种因素控制，包括河流水动力、沉积物供给和沉积物粒度。通过对干旱型分支河流体系的物理模拟与定量沉积学分析，在充分考虑河流水动力和沉积物供给等因素的基础上，明确了朵体这一重要构型在干旱型分支河流体系中的沉积演化过程。

1) 在分支河流体系的演化过程中，水道的变迁与朵体的沉积活动占据主导地位，二者共同塑造了分支河流体系的整体构型，因此朵体的沉积是分支河流体系演化中最为核心的部分之一。

2) 根据沉积模式不同，将朵体大致分为 3 类：受一陡一缓斜坡地形的影响，水道逐步由陡峭一侧向缓坡一侧横向迁移，致使沉积物侧向加积形成的侧积型朵体；地形开阔，受自身沉积作用影响，水道在一定区域内摆动，致使沉积物无序叠加形成的摆动型朵体；受狭窄陡峭的地形限制，水道迁移活动微弱，导致沉积物垂向加积而成的加积型朵体。

3) 不同类型朵体的发育区域及形态存在差异，其中侧积型朵体主要发育于扇体的侧缘，面积、横向宽度和纵向长度较大，而长宽比较小，宽厚比较大，平面上呈扇形；摆动型朵体主要发育于扇体的前缘，面积、横向宽度和纵向长度同样较大，而长宽比较小，宽厚比较大，平面上亦呈扇形；加积型朵体主要发育于扇根两侧，厚度较大，长宽比较大，宽厚比较小，平面上呈舌形。

4) 随着地形的变化，分支河流体系呈现出不同

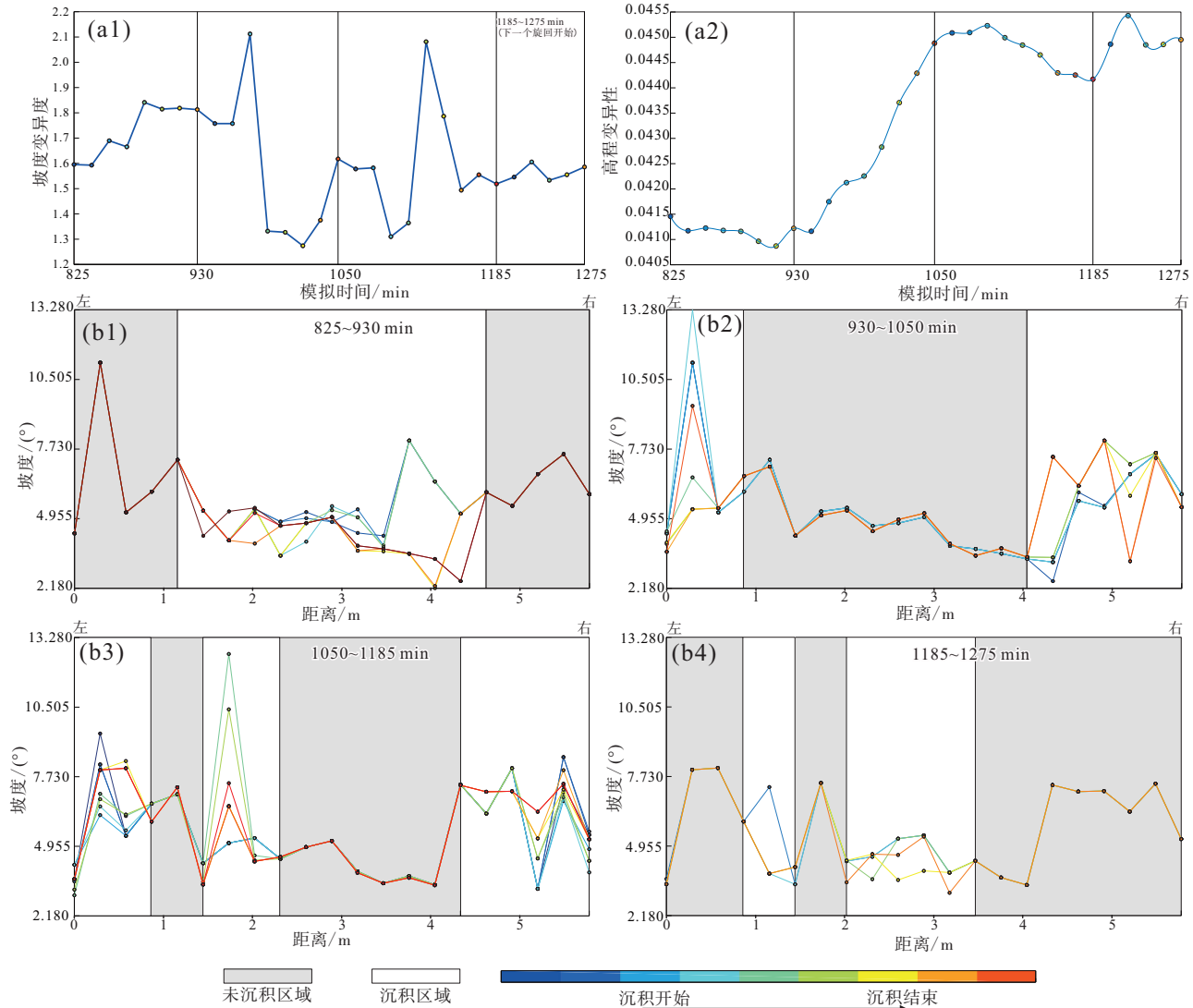


图 18 干旱型分支河流体系水槽沉积模拟实验中的扇体的坡度变化

Fig. 18 Variations of slope in flume experiment of arid distributive fluvial systems

同的演化模式。初期，地形平坦，水道活动呈现出高度规律的自旋回特征；中期，地形差异增大，自旋回模式规律性减弱，水道迁移路径变得复杂；后期，地形差异减小，自旋回过程的规律性和周期性恢复并增强。这一过程揭示出分支河流体系对地形变化的响应及其动态演化特性。

参考文献 (References)

陈欢庆, 梁淑贤, 舒治睿, 邓晓娟, 彭寿昌. 2015. 冲积扇砾岩储层构型特征及其对储层开发的控制作用: 以准噶尔盆地西北缘某区克下组冲积扇储层为例. 吉林大学学报(地球科学版), 45(1): 13-24. [Chen H Q, Liang S X, Shu Z R, Deng X J, Peng S C. 2015. Characteristics of conglomerate reservoir architecture of alluvi-

al fan and its controlling effects to reservoir development: taking alluvial fan reservoir in some area of northwest margin of Junggar Basin as an example. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 45(1): 13-24]

冯文杰, 吴胜和, 许长福, 夏钦禹, 伍顺伟, 黄梅, 景亚菲. 2015. 冲积扇储层窜流通道及其控制的剩余油分布模式: 以克拉玛依油田一中区下克拉玛依组为例. 石油学报, 36(7): 858-870. [Feng W J, Wu S H, Xu C F, Xia Q Y, Wu S W, Huang M, Jing Y F. 2015. Water flooding channel of alluvial fan reservoir and its controlling distribution pattern of remaining oil: a case study of Triassic Lower Karamay Formation, Yizhong area, Karamay Oilfield, NW China. Acta Petrolei Sinica, 36(7): 858-870]

冯文杰, 吴胜和, 印森林, 张莉, 李俊飞, 夏钦禹. 2017a. 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. 地质论评, 63(1): 219-234. [Feng W J, Wu S H, Yin S L, Zhang L, Li J F,

- Xia Q Y. 2017a. Internal architecture characteristics of Triassic arid alluvial fan in northwestern margin of Junggar Basin. *Geological Review*, 63(1): 219-234]
- 冯文杰, 吴胜和, 刘忠保, 夏钦禹, 张可, 徐振华, 向显鹏. 2017b. 逆断层正牵引构造对冲积扇沉积过程与沉积构型的控制作用: 水槽沉积模拟实验研究. *地学前缘*, 24(6): 370-380. [Feng W J, Wu S H, Liu Z B, Xia Q Y, Zhang K, Xu Z H, Xiang X P. 2017b. The controlling effects on depositional process and sedimentary architecture of alluvial fan by normal drag structure caused by thrust fault: insights from flume tank experiments. *Earth Science Frontiers*, 24(6): 370-380]
- 季政君, 荐鹏, 闵忠顺, 张宇, 张丽娜, 孟令娜. 2019. 柴达木盆地切16块路乐河组干旱型冲积扇沉积构型表征. *新疆石油天然气*, 15(3): 18-21. [Ji Z J, Jian P, Min Z S, Zhang Y, Zhang L N, Meng L N. 2019. Characterization of arid alluvial fan formation of Qie 16 Pieces of Lulehe Formation in Qaidam Basin. *Xinjiang Oil and Gas*, 15(3): 18-21]
- 蒋平, 赵应成, 李顺明, 许晓明. 2013. 不同沉积体系储集层构型研究与展望. *新疆石油地质*, 34(1): 111-115. [Jiang P, Zhao Y C, Li S M, Xu X M. 2013. Reservoir configuration research and prospect of different deposit systems. *Xinjiang Petroleum Geology*, 34(1): 111-115]
- 李相博, 刘化清, 邓秀芹, 王雅婷, 龙礼文, 魏立花, 郝斌. 2021. 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. *沉积学报*, 39(5): 1208-1221. [Li X B, Liu H Q, Deng X Q, Wang Y T, Long L W, Wei L H, Hao B. 2021. 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. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(5): 1208-1221]
- 李新坡, 莫多闻, 朱忠礼. 2006. 侯马盆地冲积扇及其流域地貌发育规律. *地理学报*, 61(3): 241-248. [Li X P, Mo D W, Zhu Z L. 2006. Developments of alluvial fans and their catchments in Houma Basin. *Acta Geographica Sinica*, 61(3): 241-248]
- 李新坡, 莫多闻, 朱忠礼, 马元旭, 刘运明. 2007. 一个片流过程控制的冲积扇: 太原盆地风峪沟冲积扇. *北京大学学报(自然科学版)*, 43(4): 560-566. [Li X P, Mo D W, Zhu Z L, Ma Y X, Liu Y M. 2007. A sheetflood-dominated alluvial fan: FengYG alluvial fan, Taiyuan Basin. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 43(4): 560-566]
- 刘大卫, 纪友亮, 高崇龙, 靳军, 杨召, 段小兵, 桓芝俊, 罗妮娜. 2018. 砾质辫状河型冲积扇沉积微相及沉积模式: 以准噶尔盆地西北缘现代白杨河冲积扇为例. *古地理学报*, 20(3): 435-451. [Liu D W, Ji Y L, Gao C L, Jin J, Yang Z, Duan X B, Huan Z J, Luo N N. 2018. Microfacies and sedimentary models of gravelly braided-river alluvial fan: a case study of modern Baiyanghe-river alluvial fan in northwestern margin of Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(3): 435-451]
- 吕峻岭, 朱一杰, 夏瑞, 郑云柯, 刘晨虎, 冯文杰, 李国艳, 杜晓峰. 2020. 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. *沉积学报*, 38(5): 994-1005. [Lü J L, Zhu Y J, Xia R, Zheng Y K, Liu C H, Feng W J, Li G Y, Du X F. 2020. Sedimentary characteristics and evolution process of arid distributive fluvial systems: insights from a flume-tank experiment. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(5): 994-1005]
- 王俊辉, 姜在兴, 张元福, 高丽明, 魏小洁, 张文昭. 2013. 三角洲沉积的物理模拟. *石油与天然气地质*, 34(6): 758-764. [Wang J H, Jiang Z X, Zhang Y F, Gao L M, Wei X J, Zhang W Z. 2013. Physical simulation of deltaic deposits. *Oil and Gas Geology*, 34(6): 758-764]
- 吴胜和, 范峥, 许长福, 岳大力, 郑占, 彭寿昌, 王伟. 2012. 新疆克拉玛依油田三叠系克下组冲积扇内部构型. *古地理学报*, 14(3): 331-340. [Wu S H, Fan Z, Xu C F, Yue D L, Zheng Z, Peng S C, Wang W. 2012. Internal architecture of alluvial fan in the Triassic Lower Karamay Formation in Karamay Oilfield, Xinjiang. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 14(3): 331-340]
- 吴胜和, 冯文杰, 印森林, 喻宸, 张可. 2016. 冲积扇沉积构型研究进展. *古地理学报*, 18(4): 497-512. [Wu S H, Feng W J, Yin S L, Yu C, Zhang K. 2016. Research advances in alluvial fan depositional architecture. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(4): 497-512]
- 印森林, 刘忠保, 陈燕辉, 吴小军. 2017. 冲积扇研究现状及沉积模拟实验: 以碎屑流和辫状河共同控制的冲积扇为例. *沉积学报*, 35(1): 10-23. [Yin S L, Liu Z B, Chen Y H, Wu X J. 2017. Research progress and sedimentation experiment simulation about alluvial fan: a case study on alluvial fan controlled by debris flow and braided river. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(1): 10-23]
- 余宽宏, 金振奎, 李桂仔, 何苗, 郭秀娟, 杨婷. 2015. 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. *古地理学报*, 17(2): 143-159. [Yu K H, Jin Z K, Li G Z, He M, Guo X J, Yang T. 2015. Conglomerate characteristics and alluvial fan evolution of the Triassic Lower Karamay Formation in Karamay Oilfield, Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 17(2): 143-159]
- 朱筱敏. 2008. *沉积岩石学*. 北京: 石油工业出版社. [Zhu X M. 2008. *Sedimentary Petrology*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 朱一杰, 夏瑞, 郑云柯, 刘晨虎, 于斌, 吕峻岭, 冯文杰. 2020. 干旱条件下冲积扇的沉积构型和演化过程: 基于水槽模拟实验. *古地理学报*, 22(6): 1081-1094. [Zhu Y J, Xia R, Zheng Y K, Liu C H, Yu B, Lü J L, Feng W J. 2020. Architectures and evolution of arid alluvial fans: insights from a flume experiment. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(6): 1081-1094]
- Bertalan L, Tóth C A, Szabó G, Nagy G, Kuda F, Szabó S. 2016. Confirmation of a theory: reconstruction of an alluvial plain development in a flume experiment. *Erdkunde*, 70(3): 271-285.
- Blair T C. 1987. Sedimentary processes, vertical stratification sequences, and geomorphology of the Roaring River alluvial fan, Rocky Mountain National Park, Colorado. *Journal of Sedimentary Research*, 57(1): 1-18.
- Blair T C. 2000. Sedimentology and progressive tectonic unconformities of

- the sheetflood-dominated Hell's Gate alluvial fan, Death Valley, California. *Sedimentary Geology*, 132(3-4): 233-262.
- Clarke L, Quine T A, Nicholas A. 2010. An experimental investigation of autogenic behaviour during alluvial fan evolution. *Geomorphology*, 115(3-4): 278-285.
- Goedhart M L, Smith N D. 1998. Braided stream aggradation on an alluvial fan margin; Emerald Lake fan, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35(5): 534-545.
- Fisher J A, Nichols G J, Waltham D A. 2007a. Unconfined flow deposits in distal sectors of fluvial distributary systems: examples from the Miocene Luna and Huesca Systems, northern Spain. *Sedimentary Geology*, 195(1-2): 55-73.
- Fisher J A, Waltham D A, Nichols G J, Krapf C B, Lang S C. 2007b. A quantitative model for the deposition of thin fluvial sand sheets. *Journal of the Geological Society*, 164(1): 67-71.
- Hartley A J, Mather A E, Jolley E, Turner P. 2005. Climatic controls on alluvial-fan activity, Coastal Cordillera, northern Chile. *Journal of the Geological Society*, 251(1): 95-116.
- Hartley A J, Weissmann G S, Nichols G J, Warwick G L. 2010. Large distributive fluvial systems: characteristics, distribution, and controls on development. *Journal of Sedimentary Research*, 80(2): 167-183.
- Spearing D R. 1974. *Alluvial Fan Deposits: Summary Sheets of Sedimentary Deposits*, Sheet 1. Boulder: Geological Society of America.
- Wang J H, Jiang Z X, Zhang Y F, Gao L M, Wei X J, Zhang W Z, Liang Y, Zhang H Y. 2015. Flume tank study of surface morphology and stratigraphy of a fan delta. *Terra Nova*, 27(1): 42-53.
- Weissmann G S, Hartley A J, Nichols G J, Scuderi L A, Olson M, Buehler H, Banteah R. 2010. Fluvial form in modern continental sedimentary basins; distributive fluvial systems. *Geology*, 38(1): 39-42.
- Zhang J J, Wu S H, Fan T E, Fan H J, Jiang L, Chen C, Wu Q Y, Lin P. 2016. Research on the architecture of submarine-fan lobes in the Niger Delta Basin, offshore West Africa. *Journal of Palaeogeography*, 5(3): 185-204.
- Zhang K, Wu S H, Feng W J, Xu Z H, Wang J J, Zhang J J, Peng Y J. 2021. Experimental study of fan delta evolution: autogenic cycles of fully confined channelized flow and small secondary channelized flows. *Sedimentary Geology*, 426: 106024.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 龚承林)

《古地理学报》新版网站(www.gdlib.cn)于2025年5月正式上线

《古地理学报》门户网站(www.gdlib.cn)于2025年5月正式上线了。

与旧版网站相比,《古地理学报》新版网站采用最新网络技术搭建,安全性大幅提高。新版网站支持多媒体信息展示,页面更加活泼,易读性更强。每期文章的列表展示有“简洁列表”、“带摘要列表”、“带图片列表”等3种模式,其中“带摘要列表”模式更是可以快速浏览当期的所有文章摘要。在每篇文章的“文章摘要”、“html全文”链接中,可以更简便地浏览文章内容,也可以看到与文章有关的“相关文章”、“Metrics”(用于统计本文的网络浏览等)等内容,还可以通过“本文评价”围绕文章进行学术探讨。网站新增了“高被引论文”、“虚拟专辑”以及4个视频栏目,分别是“古地理学论坛”、“古地理会议”、“专家团队”和“科普视频”,给读者提供更多维度的信息。页面左侧新增“读者中心”、“审稿人中心”专栏,更好地为读者投稿和专家审稿服务。

新版网站的网址依旧是www.gdlib.cn。需要提醒的是,原本收藏了《古地理学报》旧版网站的读者需要更新一下收藏。

希望《古地理学报》新版网站能给新老读者、作者、审稿专家带来更好的阅读和使用体验,也希望您继续关注和支持《古地理学报》,并给我们提出宝贵意见和建议!

《古地理学报》编辑部

二〇二五年六月