

三角洲沉积的物理模拟

王俊辉,姜在兴,张元福,高丽明,魏小洁,张文昭

(中国地质大学 能源学院,北京 100083)

摘要:为进一步清晰地认识三角洲的沉积特征及砂体发育规律,利用水槽实验对三角洲的发育过程进行了物理模拟,追踪了河口坝、分流河道和滑动-滑塌砂体的沉积过程与沉积特征。通过观察与分析,认为三角洲生长是多次侵蚀与沉积交替的结果,其中洪水期侵蚀作用小于沉积作用,表现为“填低补平”;枯水期侵蚀作用大于沉积作用,表现为“削高填低”。河口坝的发育从水下浅滩开始,按照向前-垂向-一向后-横向的顺序进行生长,并且存在单个河口坝的多级分流与多列河口坝的同时分流两种分流方式。三角洲平原河道演变包括河流改道与分流两种方式,分别与洪水和河口坝有关。洪水事件可以作为三角洲前缘滑动-滑塌沉积的触发因素。三角洲是河流搬运、卸载与蓄水体接受、改造沉积物动态变化过程中的产物,在此过程中形成沉积坡折带,它是优质储层发育的有利场所。

关键词:水槽实验;三角洲模拟;河口坝;分流河道;滑动-滑塌沉积;优质储层

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Physical simulation of deltaic deposits

Wang Junhui, Jiang Zaixing, Zhang Yuanfu, Gao Liming, Wei Xiaojie, Zhang Wenzhao

(School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to fully understand the sedimentary characteristics of deltaic deposits and the development patterns of associated sand bodies, this paper presents a physical simulation of delta development through flume experiment and introduces the experiment results in respects of sedimentary process and characteristics of distributary channels, mouth bars, and slide-slump deposits. The experiment reveals that the development of delta is an alternating process of deposition and erosion. Deposition is dominant in flood season when distributary channels carry a heavy sediment load, while erosion is dominant in non-flood season. The growth of mouth bars initiates from an underwater shoal in an order of forward, upward, backward and transverse. In addition, there are two modes of bifurcation, i. e. multi-stage bifurcation by one mouth bar and simultaneous bifurcation by multiple mouth bars. The channels on a deltaic plain may evolve in two modes, i. e. redirection and diversion, which are related with flood and mouth bar respectively. Flood events could be the trigger of delta front slide-slump deposits. Deltas are formed in the process of sediment transportation and sedimentation determined by the interaction of alluvial and basinal dynamics. In this process, sedimentary slope break is formed, which is favorable for the development of high quality reservoirs.

Key words: flume experiment, delta simulation, mouth bar, distributary channel, slide-slump deposit, high quality reservoir

沉积模拟是沉积学发展的重要手段^[1-2]。在生产实践中,我们所接触到的大都是经过漫长的地质时期而保存下来的沉积岩,解释各种砂体的形成过程多是用反推的思路^[3-5],许多反映沉积过程的信息都已经丢失^[6]。因此,对于沉积过程的研究,主要是通过现代沉积考察与实验室沉积模拟两种方法。自沉积模拟研究出现以来,主要经历了以下阶段:以 Simons 为代表的研究流体流动状态、底形沉积特征为主要内容的初级阶段;河流、浊流、风洞、风暴等诸多领域的大发展阶

段;到目前,计算机技术迅猛发展,加之油气勘探迫切需要研究砂体形成机理,沉积模拟进入了湖盆砂体形成过程和演化规律的半定量-定量化模拟阶段^[7-8]。

三角洲发育多种砂体,包括分流河道、河口坝、远砂坝和席状砂等,是油气田中重要的储集层。这些砂体往往相互叠置出现,空间组合不仅复杂而且变化大,并且靠近潜在的生油层,较容易形成油气藏。对于三角洲砂体的发育规律进行详细研究,具有重要的科学与生产价值^[9-10]。前人关于三角洲的调查研究,大多

收稿日期:2012-07-26;修订日期:2013-11-06。

第一作者简介:王俊辉(1988—),男,博士研究生,沉积学、层序地层学、油气储层地质与评价。E-mail: wangjhjl@163.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05009-002);国家自然科学基金项目(41102089)。

采用现场勘测或数值模拟的方法^[11-14],而三角洲特别是湖泊三角洲,对构造、气候、物源和河流体制等甚为敏感,各种因素相互干扰,使得对三角洲各微相形成过程的描述变得困难。本次实验通过对瞬间湖泊三角洲的沉积模拟,追踪并分析了分流河道、河口坝、滑动-滑塌沉积等在实验条件下的沉积过程与沉积特征,比较立体直观地展现了三角洲沉积体的特征,有助于进一步掌握三角洲前缘砂体的形成机理与沉积水动力背景,进而可能对储层预测、油气勘探提供借鉴意义,并为沉积模拟积累一定的经验。

1 实验装置

本次三角洲模拟实验是在人工制造的湖盆中进行的,并借鉴了前人开展相关研究所设计的装置^[15-21]。本次实验的具体配套装置如图 1 所示。

湖盆主体由玻璃水槽构成,规模为长 6 m、宽 3 m、高 1 m,并建立了三维坐标系以便于数据的采集与记录。加水器由阀门控制流量,完成不同实验时期的流量要求。由加水器流出的水经进水口进入加沙池,与相应比例的混合沉积物混合,水流携带沉积物由出水口流出,进入冲积——三角洲沉积体系,同时用自吸泵与排水池共同控制湖盆水深。实验中出水口距离岸线大约有 0.8 m,即模拟了部分陆上冲积体系,目的是为了在河流进入湖盆后,自发调节产生三角洲,以降低人为因素的影响。

2 实验过程

实验共分为两轮(RUN1, RUN2),两轮实验除了

水深下降 2 cm 外,其他参数尽量保持一致,模拟水退条件下的三角洲建设,并且在实验过程中严格控制加沙组成、加沙量与流量。根据前人类似实验,每轮实验分为平水期、洪水期和枯水期 3 个阶段,并按照平水期-洪水期-枯水期的顺序进行,时间分配大致为 2 : 1 : 1^[17],每个阶段之间均有一个过渡过程,避免出现流量突变的情况而影响实验效果(表 1)。

实验结果表明,在流量和泥沙输入量可变条件下,三角洲生长是多次侵蚀与沉积交替的结果。洪水期由于含沙量大,河道迁移迅速,侵蚀作用小于沉积作用,表现为“填低补平”,有助于三角洲的整体均匀推进及垂向加厚,特别有利于三角洲的垂向加厚;枯水期由于含沙量小,水量小,河道发育少且固定,侵蚀作用大于沉积作用,表现为“削高填低”,河道变深,河流自身携带的以及侵蚀的沉积物在河口处沉积,有助于三角洲的不均匀推进而形成新的朵叶体;平水期的表现则介于两者之间。

3 微相特征

3.1 河口坝

河口坝是三角洲沉积体系中最基本的要素,它的形成受到河流与蓄水体一系列的相互作用。如果忽略潮汐与波浪作用的影响,河口区沉积物卸载主要受到三种基本作用力:流水惯性力、底床摩擦力与蓄水体提供的浮力。其中,惯性力主要由河流的流量与流速决定;摩擦力主要取决于河口区床底的地形与深度,深度小则摩擦大;浮力主要与河水和湖水之间的密度差有关^[22]。在本次实验条件下,河口坝的形成主要受控于流水惯性力与底床摩擦力。关于河口坝在这两种作用

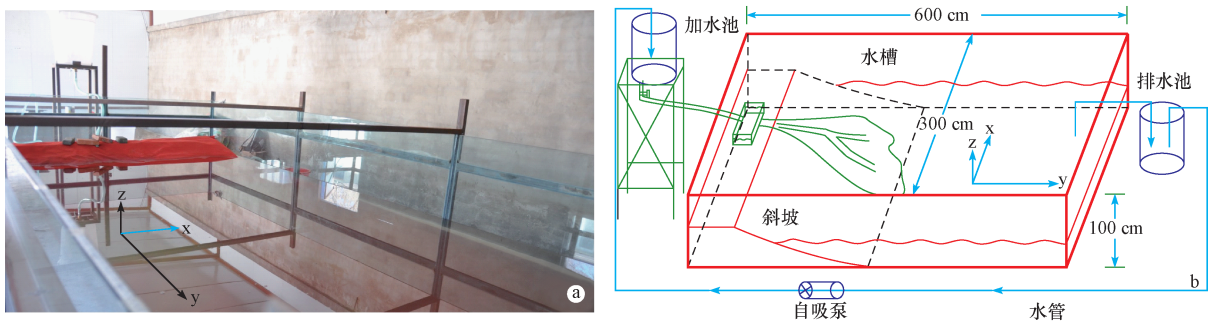


图 1 实验装置照片(a)与示意图(b)

Fig. 1 The experimental facility(a) and its sketch(b)

表 1 沙量、流量、时间及水深控制^[17-19]

Table 1 Controlled variables in the experiment^[17-19]

模拟沉积时期	加沙组成 (砂:粉砂:粘土)	含沙量/%	流量/(L·s ⁻¹)	历时/min		水深/cm	
				RUN1	RUN2	RUN1	RUN2
洪水期	2 : 3 : 1	18 ~ 20	0.8 ~ 1.0	16	20	35	33
平水期	1 : 4 : 1	13 ~ 15	0.5 ~ 0.8	30	40	35	33
枯水期	0 : 2 : 1	8 ~ 10	0.3 ~ 0.4	20	24	35	33

力下的形成过程,主要有以下几点认识。

1) 河口坝的形成从雏形开始,规模慢慢增大,直至升出水面

河流入湖,在河口区粗碎屑优先沉积,并向水下延伸,形成水下浅滩——河口坝的雏形(图2)。其延伸距离与入湖水流强度有关,强度大,延伸长;强度小,延伸短。

2) 河口坝的发育有一定的规律可循

河流入湖,河水与蓄水体混合,紊乱发散,流速骤减,水流携带的沉积物开始卸载,并由惯性力搬运至远处,形成水下浅滩。此时,亦可视为水下分流河道的发育阶段。其中,粗碎屑具有较大的惯性,会沉积在距河口稍远的前方(浅滩的中部);浅滩在抬升过程中,底床摩擦逐渐增大,引发河口处沉积速率增加,加速了垂向加积;浅滩逐渐加厚,对水下河道的摩擦进一步增大,水动力减弱加快,粗碎屑沉积位置向后退;河口坝逐渐接近水面,开始在纵向上向上游延伸,导致分流间距增大,河口坝横向扩展。可以总结为,河口坝的形成按照向前——垂向——向后——横向的顺序,它们之间是一个连续的过程并且互为因果,没有截然界线。随着河口区沉积物进一步沉积,河口坝逐渐纵向、横向生长,使有的分流河道逐渐废弃。经过多级分流,不同期次的河口坝连片,沿岸线展布并控制三角洲朵叶体的发育。

3) 河口坝接近水面后的发育情况

根据实验观察,河口坝在生长至接近水面后,发育

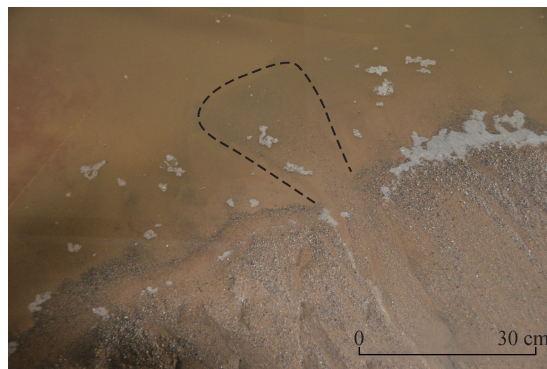


图2 河口坝雏形(RUN2, 平水期, 29min)

Fig. 2 Initiation of a mouth bar

(29 min in mid-flow period, RUN2)

有两种形式:①河口坝将河流一分为二(图3a,b),若两者强弱相差大,则较弱的分流河道逐渐断流、废弃,较强的分流河道继续分叉;若两者水流强度相当,则两条分流河道再由新形成的两个河口坝分为4条(图3a),此即单个河口坝的多级分流作用;②若分流河道较宽,在河口处几乎同时形成多个与水流方向平行的长条形河口坝,将一条分流河道几乎同时分隔成多条(一般3~5条,图3c,d),水流强度较弱的次要分流河道逐渐断流、废弃,此为多列河口坝的同时分流作用。

3.2 分流河道

分流河道的演变与水流携带沉积物的粒度、在三角洲中所处的位置、河流流量、蓄水体水位以及构造作

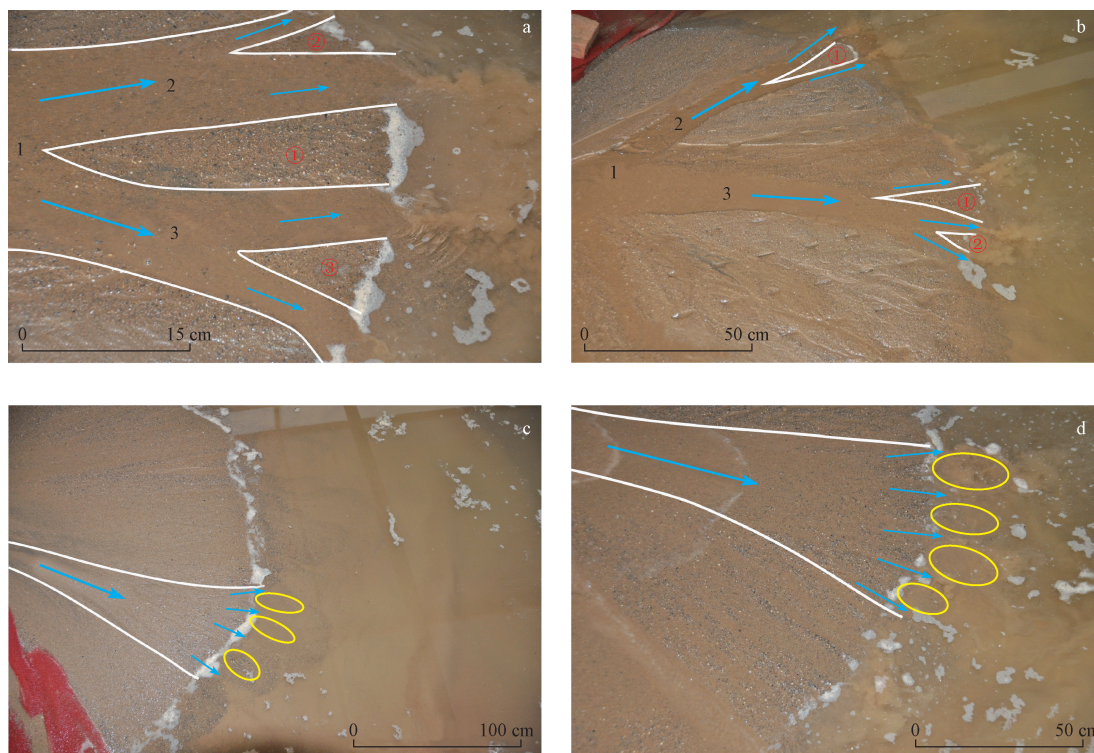


图3 河口坝接近水面后的发育情况

Fig. 3 Process of mouth bar development near water surface

a. RUN1, 枯水期, 8min; b. RUN1, 枯水期, 15min; c. RUN1, 平水期, 20min; d. RUN1, 平水期, 30min

用等因素有关^[23]。在整个实验过程中,分流河道的演变包括河流改道与分流两种方式,分述如下。

1) 河流改道:河道淤积抬升,决口,水流改道,通常伴随着新河道的形成与旧河道的废弃。

相对较宽的分流河道,泥沙沉积使得河道糙度增加,坡降减小,由此引起沉积作用进一步发生^[19],加之三角洲平原本身沉积物未经压实,较松散,在水流作用下河道容易决口。并且宽浅的河道,在地貌凸起地带水动力相应变弱,粗颗粒在此处优先沉积,使河床抬升。洪水期河水在堤岸薄弱部位决口,导致河道改道。

2) 河道分流:主要与河口坝的形成有关。河口坝本身导致分流,并使河道的分流点向上游迁移,同时导致河道摆动。

河口坝本身就起分隔、阻挡水流的作用,上游水流在流近河口坝的过程中流速逐渐变小,沉积物在河口坝后沉积,在分流河道下游形成向上游变细、类似筛状沉积,具有溯源沉积的特点(图4),进而导致分流河道摆动,使分流河道分流,形成次级分流河道、次级河口坝,最终导致三角洲朵体横向扩展。

3.3 滑动-滑塌沉积

实验中滑动-滑塌沉积主要发生在洪水期,河床的冲刷作用使大量沉积物从三角洲平原迁离,并被搬运到三角洲斜坡前部堆积起来,在此过程中常发生滑动-滑塌,形成在河口前方呈舌状前积的滑动-滑塌沉积(图5)。可见,洪水也是形成滑动-滑塌沉积的一个诱发因素。

从静态与动态两个角度对滑动-滑塌沉积形成的原因进行了以下分析。

1) 沉积因素:河口处沉积速率最高,随着时间的推移河口前方坡度变陡;三角洲前缘沉积物密度倒置,前积砂体上覆于未压实的饱含水的前三角洲泥质之上。由于差异压实作用,三角洲前缘前积砂体处于非常不稳定的状态,在洪水期或负载超过临界,以及其他因素的诱发下,会向深水处崩落、滑动、滑塌,形成滑动-

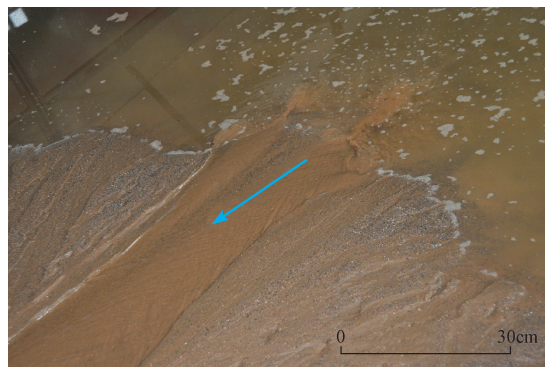


图4 河口坝与分流河道的关系

Fig. 4 Relation between mouth bar and distributary channel

滑塌沉积;另外随着入湖水流的增多,分流间湾有的已经变成狭窄的沟槽,可能做为滑动-滑塌沉积物继续搬运的通道。

2) 触发因素:①入湖水流急,水下流速大,在水流的扰动下,沿前缘斜坡向深水处滑动-滑塌;②洪水期带来大量的沉积物,并在河口处快速堆积,沉积负荷突然增大,对其下部尚未固结的早期沉积进行压实、压扁,破坏了原来的重力平衡,发生滑动-滑塌。

在实验中观察到的洪水型滑动-滑塌沉积砂体从形态上大致可以分为两种。

1) 在洪水事件中,粗粒沉积物由于本身惯性大,可以进入水体较深处,在水道两侧及前端沉积,形成外围粗、中间细、前端宽、后端窄的舌状沉积体,其沉积物自外围向中央变细,具有同心分布的特点(图5a)。这是由于入湖的洪水,在开阔水体中向四周减弱的原因。其前端可延伸至水体较深处,覆盖在前三角洲泥质沉积之上,形成潜在的岩性圈闭。

2) 入湖水流强至某一程度,水下分流河道前方不再形成舌状或尖峰状粗粒沉积,而是形成沙泥混杂的沉积体(图5b)。分析其原因为:①水流携带大量的泥沙沉积物,在河口处来不及分选,一并沉积下来,部分泥质被携带至深水处沉积,部分粗颗粒由于本身较大的惯性也会进入水体较深处,形成沙泥混杂的现象。

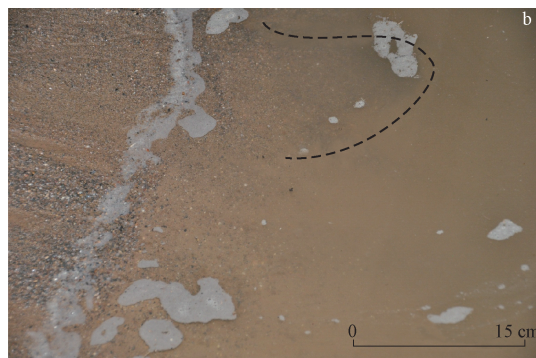
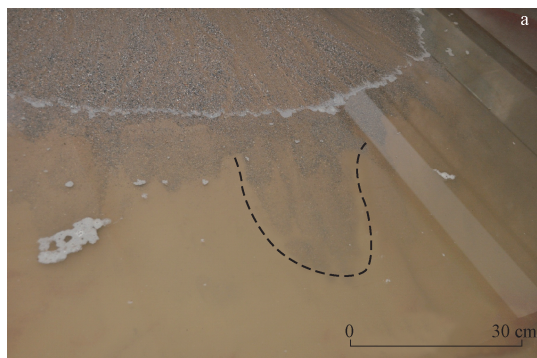


图5 滑动-滑塌沉积的两种形态

Fig. 5 Two forms of slide-slip deposits

a. RUN1, 洪水期, 12min; b. RUN2, 洪水期, 20min

②入湖水流强,搅动前期沉积物,产生摩擦并使搬运而来的沉积物一并沉积。

3.4 水下分流河道与分流间湾

河流入湖尚未形成河口坝时在水下呈舌状或尖峰状的水下浅滩——河口坝雏形,或可视作水下河道。在河口坝发育的某一阶段,水下河道会终止发育。并且伴随河口坝的发育,河道分流,形成新的水下分流河道。在相邻的两条水下分流河道之间相对凹陷的地区形成分流间湾(图6a)。

分流间湾由于地势低洼,“三面环砂”(图6a)——两侧的水下分流河道砂与后方的河口坝,在湖浪、湖流作用下再搬运沉积,分流间湾就成为了砂质二次沉积的场所。

新生朵叶体呈喇叭状向深水处发育,其边缘与前期发育的朵叶体之间形成以泥质沉积为主的朵叶体间湾(图6b)。朵叶体间湾与分流间湾相比,水深更大,经湖浪、湖流改造后也可能形成较厚的砂质沉积,具有形成储层的潜力;也可以用于限定三角洲朵叶体的范围。

3.5 垂向序列

三角洲在发育过程中,不断从物源方向向蓄水盆地推进,在三角洲平原以分流河道为骨架,形成过路沉积;河流入湖,进入到三角洲前缘沉积区,在三角洲前缘前积并接受蓄水体改造;最后沉积的悬移质被搬运到深水区的前三角洲。在这一过程中,沉积物在“转折部位”优先卸载,即相对粗碎屑于水动力变弱处优先沉积,导致在河道主流线之间与河口地区,沉积物最粗。

其中,三角洲平原亚相包括沼泽、决口扇、天然堤、分流河道(前三者未能较好模拟);三角洲前缘亚相包括了水下分流河道、水下天然堤、分流间湾、河口坝、前缘席状砂与远砂坝(此两者未能较好模拟),以及由河口区滑动-滑塌而来的滑动-滑塌砂体;前三角洲则主要以粉砂质与泥质为主,一定条件下可发育浊流沉积(未能较好模拟)。其沉积序列如图7所示:底部为

前三角洲,主要为泥质沉积,也会夹有洪水期带来的粉砂质;向上为三角洲前缘,依次为洪水型滑动-滑塌砂体、水下分流河道远端的远砂坝、水下分流河道、分流间湾与席状砂、河口坝;顶部为三角洲平原,以分流河道与分流河道间沉积为主。

沉积序列整体上下细上粗的反韵律沉积,但局部会出现正韵律,如滑动-滑塌砂体顶部、水下分流河道、河口坝顶部等。水流在与蓄水体相互作用过程中能量逐步衰减,粗粒沉积物优先沉积,细粒沉积物被进一步搬运至远处,形成反旋回;优先沉积的粗粒沉积物向上游方向又会阻挡水流,出现反旋回顶部的正旋回。

4 三角洲有利储层分布

三角洲前缘地区不同类型砂体纵向叠置,横向连片,形成广泛的砂体组合(图8)。

4.1 沉积坡折带

从优质储层发育的位置来看,沉积坡折带的位置为有利的储层发育区。沉积坡折带是指始于三角洲平原和三角洲前缘的结合部位的地形坡度突变带^[21],它在三角洲形成过程中自发调节产生。它的形成是必然的,三角洲朵体在前积和加积作用下不断生长,当三角洲平原顶部到达沉积基准面时,沉积物在三角洲平原形成“过路沉积”,在三角洲前缘呈“S型前积”,形成斜坡,在湖盆底部形成“下超”(图8c)。该处是沉积作用的活跃地带,三角洲平原分流河道末端以及三角洲前缘的主要储集砂体均发育在此位置。

4.2 出水口轴线

携带沉积物的水流到达沉积基准面之前,沉积物优先就地沉积,剩余沉积物则被进一步携带至更远处,导致三角洲平原位于出水口轴线方向上的沉积

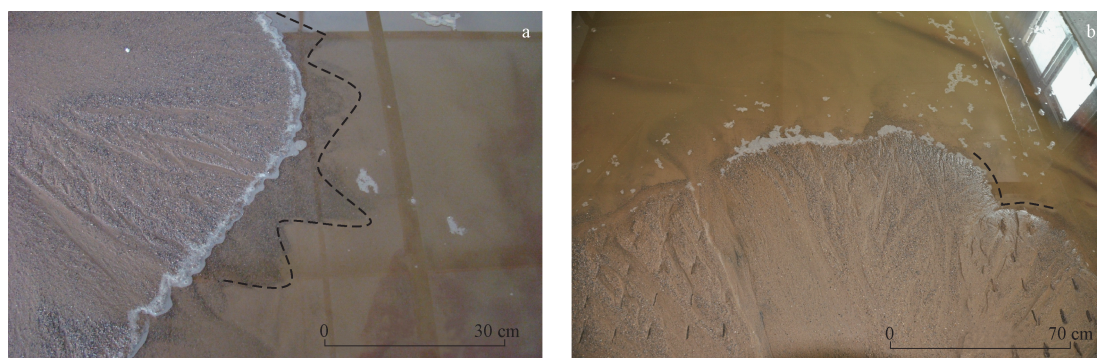


图6 水下分流河道、分流间湾与朵叶体间湾

Fig. 6 Underwater distributary channel, interdistributary bay and interlobe bay

a. RUN1,洪水期,4min;b. RUN2,平水期,31min

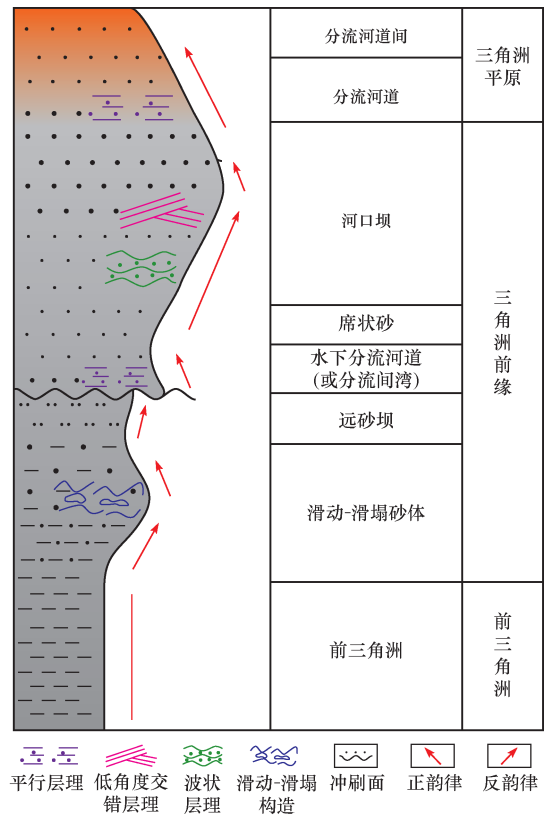


图 7 模拟三角洲垂向序列
Fig. 7 Vertical sequence of a simulated delta

厚度也较大(图 8b)。三角洲上的分流河道主要发育在与轴向夹角为 $\pm 40^\circ$ 的范围内,该区域三角洲分流河道频繁摆动迁移,形成砂岩分布的高值区,也可构

成有利的油气储集相带。

5 讨论

1) 本次水槽实验较好地模拟了瞬间湖泊三角洲的发育过程及多种砂体的形成规律,并揭示了三角洲的形成是一个不断自发调节的过程。在洪水期以沉积作用为主,表现为“填低补平”;枯水期则以侵蚀作用为主,表现为“削高填低”。

2) 河口坝按照向前—垂向—向后的顺序进行生长,它们之间是一个连续的过程,没有截然界线。河口坝对河道的分流作用,可以表现为单个河口坝的多级分流与多列河口坝的同时分流两种方式。

3) 三角洲平原河道演变包括河流改道与分流两种方式,分别与洪水事件、河口坝有关。水流在流近河口坝的过程中,沉积物会溯源沉积,进而导致分流河道摆动,三角洲横向扩展。

4) 洪水可能诱发滑动、滑塌事件,由此形成的洪水型滑动—滑塌沉积砂体从形态上可以分为外围粗、中间细,前端宽、后端窄的舌状型与沙泥混杂型两种。

5) 三角洲有利储层集中在沉积坡折带与主流线附近。这两处是沉积作用的活跃地带,三角洲平原主要分流河道以及三角洲前缘的主要储集砂体均发育在此位置,且沉积厚度大,形成砂岩分布的高值区,可构成有利的油气储集相带。

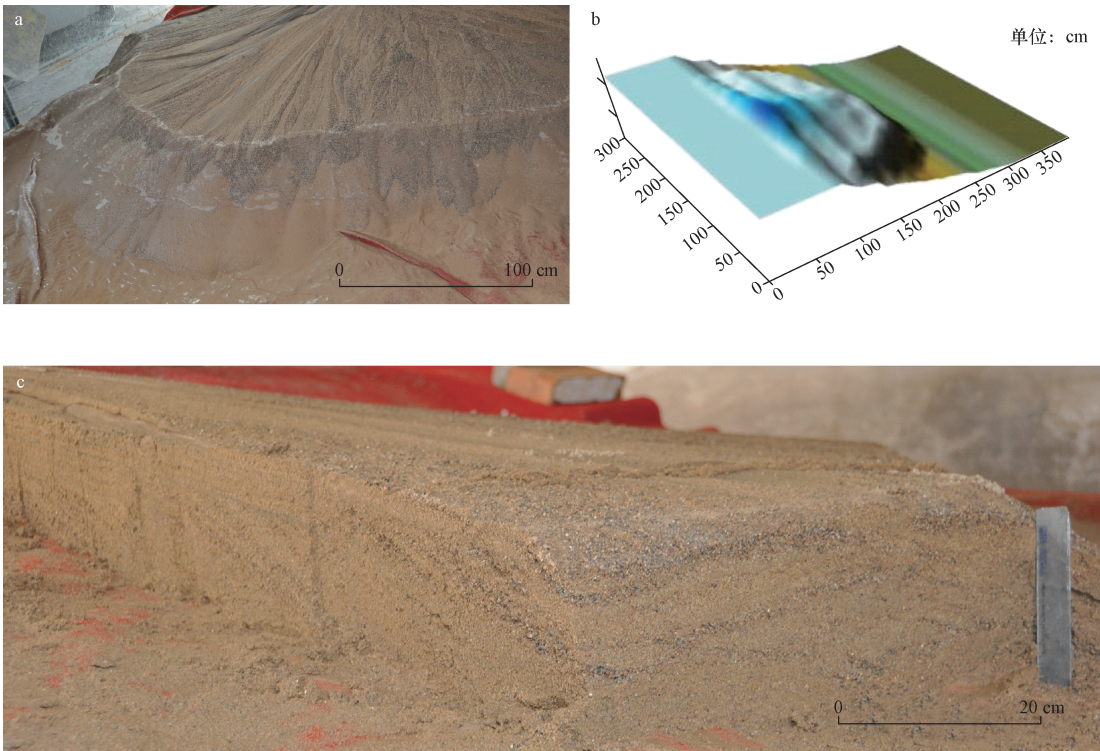


图 8 模拟三角洲平面与剖面形态
Fig. 8 Plain and sectional views of a simulated delta
a. 实验后三角洲完整图;b. 实验后三角洲表面图;c. 三角洲前缘砂体发育情况

参 考 文 献

- [1] 吴因业,朱如凯,罗平,等. 沉积学与层序地层学研究新进展——第18届国际沉积学大会综述[J]. 沉积学报,2011,29(1): 199–206.
Wu Yinye, Zhu Rukai, Luo Ping, et al. Advance on sedimentology and sequence stratigraphy: a summary from 18th International Sedimentology Congress[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(1), 199–206.
- [2] 张春生. 碎屑岩沉积模拟技术[M]. 北京:石油工业出版社, 2003:3–12.
Zhang Chunsheng. Sedimentary modeling techniques for siliclastic rocks[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:3–12.
- [3] 徐强,王英民,吕明,等. 陆架边缘三角洲在层序地层格架中的识别及其意义——以南海白云凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 733–742.
Xu Qiang, Wang Yingmin, Lü Ming, et al. Identification and significance of shelf margin delta in sequence stratigraphic framework: a case study of Baiyun Sag, South China Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 733–742.
- [4] 封从军,鲍志东,单启铜,等. 三角洲平原复合分流河道内部单砂体划分——以扶余油田中区南部泉头组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 77–83.
Feng Congjun, Bao Zhidong, Shan Qitong, et al. Single sand body identification in compound distributary channel of delta plain: a case study from the fourth member of Quantou Formation in the southern part of central Fuyu oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 77–83.
- [5] 谭先锋,田景春,黄建红,等. 陆相碎屑岩旋回沉积记录中的物质响应及聚集规律——以济阳坳陷王家岗地区古近系孔店组为例[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(3): 332–341.
Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Huang Jianhong, et al. Material responses and accumulation patterns in cyclic sediment records of continental clastic rocks: taking the Paleogene Kongdian Formation of Wangjiagang area in Jiyang Depression as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 332–341.
- [6] Postma G, Kleinans M G, Meuer P T, et al. Sediment transport in analogue flume models compared with real-world sedimentary systems: a new look at scaling evolution of sedimentary systems in a flume[J]. Sedimentology, 2008, 55(6): 1541–1557.
- [7] 张春生,刘忠保,施冬,等. 碎屑物理模拟研究的理论与方法[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(4): 300–303.
Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. Theory and method of physical simulation in clastic sedimentation[J]. Oil & Gas Geology, 2000, 21(4): 300–303.
- [8] 李敏,朱红涛,郭巧珍,等. 沉积物理模拟技术进展及发展趋势[J]. 地质科技情报, 2010, 29(4): 137–141.
Li Min, Zhu Hongtao, Guo Qiaozhen, et al. Progress and developing tendency of sedimentary laboratory experiments technique[J]. Geological Science and Technology Information, 2010, 29(4): 137–141.
- [9] Paola C, Straub K, Mohrig D, et al. The “unreasonable effectiveness” of stratigraphic and geomorphic experiments[J]. Earth-Science Reviews, 2009, 1–4(97): 1–43.
- [10] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社, 2010:170–188.
Jiang Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010:170–188.
- [11] Prior D B, Yang Z S, Bornhold B D, et al. Active slope failure, sediment collapse and silt flows on the modern subaqueous Huanghe Delta[J]. Geo-Marine Letters, 1986, 6(2): 85–95.
- [12] Komar P D. Coastal erosion-underlying factors and human impacts [J]. Shore & Beach, 2000, 68(1): 3–16.
- [13] Yin Yanhong, Zhou Yongqing, Ding Dong. Evolution of modern Yellow River delta coast[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(2): 32–42.
- [14] Gao Tao, Li Guangxue, Shi Jinghao, et al. A flume test on erosion mechanism for an abandoned section of the Huanghe (Yellow) River Delta[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2010, 28(3): 684–691.
- [15] 赖志云,周维. 舌状三角洲和鸟足状三角洲形成以及演变的沉积模拟实验[J]. 沉积学报, 1994, 12(2): 37–43.
Lai Zhiyun, Zhou Wei. Experimental formation and development of lobate and birdfoot deltas[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1994, 12(2): 37–43.
- [16] 刘忠保,赖志云,汪崎生. 湖泊三角洲砂体形成及演变的水槽实验初步研究[J]. 石油实验地质, 1995, 17(1): 34–41.
Liu Zhongbao, Lai Zhiyun, Wang Qisheng. Flume-experimental study on the formation and evolution of lake delta sand body[J]. Experimental Petroleum Geology, 1995, 17(1): 34–41.
- [17] 张春生,刘忠保,施冬,等. 三角洲分流河道及河口坝形成过程的物理模拟[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 168–175.
Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. Physical simulation of formation process in distributary channels and debouch bars in delta[J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 2000, 7(3): 168–175.
- [18] 张春生,刘忠保,施冬,等. 扇三角洲形成过程及演变规律[J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 521–525.
Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. Formed proceeding and evolution disciplinarian of fan delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 521–525.
- [19] 张春生,刘忠保,施冬,等. 砂质扇三角洲沉积过程实验研究[J]. 江汉石油学院学报, 2003, 25(2): 1–3.
Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. Experimental study of sandy-fan-delta sedimentary process[J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2003, 25(2): 1–3.
- [20] 张关龙,陈世悦,鄢继华,等. 三角洲前缘滑塌浊积体形成过程模拟[J]. 沉积学报, 2006, 24(1): 50–55.
Zhang Guanlong, Chen Shiyue, Yan Jihua, et al. Simulation of fluxoturbidite in front of delta[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(1): 50–55.
- [21] 刘晖,操应长,徐涛玉,等. 沉积坡折带控砂的模拟实验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2007, 26(1): 34–37.
Liu Hui, Cao Yingchang, Xu Taoyu, et al. The simulation experiment about the control of sandy body in depositional slope-break belt[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 26(1): 34–37.
- [22] Wright L D. Sediment transport and deposition at river mouths: a synthesis[J]. Geological Society of America Bulletin, 1977, 88(6): 857–868.
- [23] 张春生. 三角洲分流河道演变规律研究[C]//2002年低渗透储层昆明会议论文摘要, 昆明, 2002.
Zhang Chunsheng. Research on developmental characteristics of deltaic distributary dannels[C]//Abstract book of conference workshop on low permeability reservoirs in 2002. Kunming, 2002.

(编辑 张亚雄)