

文章编号: 1000-0550(2000)04-0521-06

# 扇三角洲形成过程及演变规律<sup>①</sup>

张春生<sup>1,2</sup> 刘忠保<sup>2</sup> 施冬<sup>2</sup> 贾爱林<sup>3</sup>

1(成都理工学院博士生 成都 610059) 2(江汉石油学院地质系 湖北荆州 434102)

3(石油勘探开发科学研究院 北京 100083)

**摘要** 应用实验沉积学的方法对扇三角洲的形成过程及演化规律进行了较为详细的研究。指出扇三角洲的形成是突发性洪流与常态水流交替作用的结果,洪水期以碎屑流或泥石流沉积为主,平水期以牵引流沉积为主。随着沉积作用的延续,在基准面下降过程中,扇三角洲形态在平面上不同步增长,展宽速率大于伸长速率,扇三角洲的形态呈边缘圆滑的舌状。辫状河道的迁移摆动是导致扇三角洲演化的根本内在原因,而构造运动的强度与辫状河道的迁移摆动速率呈近似正相关关系。湖水深度、入湖坡降、辫状河道的形态、流量变化率以及粒径大小是影响扇三角洲演化的重要因素。

**关键词** 模拟实验 形成过程 演化规律 扇三角洲

**第一作者简介** 张春生 男 1963 年出生 副教授 沉积学 模拟实验

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

自从在扇三角洲沉积中发现丰富的油气资源以来,扇三角洲的研究方兴未艾。国内外许多地质学家从不同的观点出发,系统总结了扇三角洲的沉积模式和沉积特征<sup>[1,2,3]</sup>,对扇三角洲储层的勘探开发起到了很好的指导作用。

前人对扇三角洲的研究注重于井下砂体解剖和露头剖面的观察,应该说到目前为止,对扇三角洲的沉积过程、沉积作用以及演化特征,沉积学家了解的并不多。然而对于扇三角洲储集砂体形成过程的研究是正确认识和预测该类砂体分布规律、进而有效地指导油气合理高效地勘探开发所必不可少的。本文应用中国石油天然气集团公司沉积模拟重点实验室的实验设备和研究手段对扇三角洲的沉积过程和演变规律进行了较深入的研究,以期获得一些有价值的认识。

## 1 实验方案

### 1.1 实验装置简介

扇三角洲形成过程及演变规律的模拟实验在具有活动底板的湖盆中进行。该湖盆长 16 m,宽 6 m,高 1 m,底板活动区面积 30 m<sup>2</sup>,可以向任意方向倾斜和升降。湖盆四周设 6 个出水口(或进水口)。水砂的运动过程可以自动跟踪测量,以确定流速、流向、水深、含砂

量等流速场特征。沉积物的供给过程(加砂过程)可以按实验要求分级组合自动控制。在湖盆上设置有高精度砂体测量系统,可以准确适时地检测和录制泥砂搬运及沉积过程、沉积物的厚度变化、砂体分布及演变规律。任一质点在流速场内的运力学过程可以自动监测(图 1)。实验装置的功能能够满足扇三角洲沉积过程研究的需要。

### 1.2 实验方案设计

根据实验装置特点,本实验着重对断陷湖盆型扇三角洲沉积过程和演变规律进行研究,因此方案设计的指导思想是针对断陷湖盆特征,研究扇三角洲形成过程的一般规律,而不局限于某一具体扇三角洲。参数设计的依据由现代沉积调查获得<sup>①②③</sup>。

设计实验模型中 Y 方向的有效使用范围为 0~12 m, X 方向有效使用范围为 0~6 m。原始底形由中细砂组成。入湖坡度 0~7 m 段坡降 50‰, 7~12 m 为湖盆区,坡度 10‰。原始河道设计宽 100 cm,深 5 cm,延伸长度 7 m。按照自然界的一般规律,模型中设计时间比例为洪水:平水:枯水=3:6:3。设计洪水、平水、枯水的流量比例为 6:3:1。不同的流量过程设计不同的加砂组成级配(表 1),来水来砂周期按平水—洪水—平水—枯水的顺序进行。

① 国家重点基础研究发展规划项目(G1999022 507)和中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室项目(95-109-01-12)联合资助

② 张春生等. 云南洱海盆地现代沉积类型, 科研报告, 1996.

③ 张春生等. 青海湖现代沉积体系及分布特征, 科研报告, 1997.

④ 张春生等. 内蒙古岱海湖沉积环境与沉积体系, 科研报告, 1998.

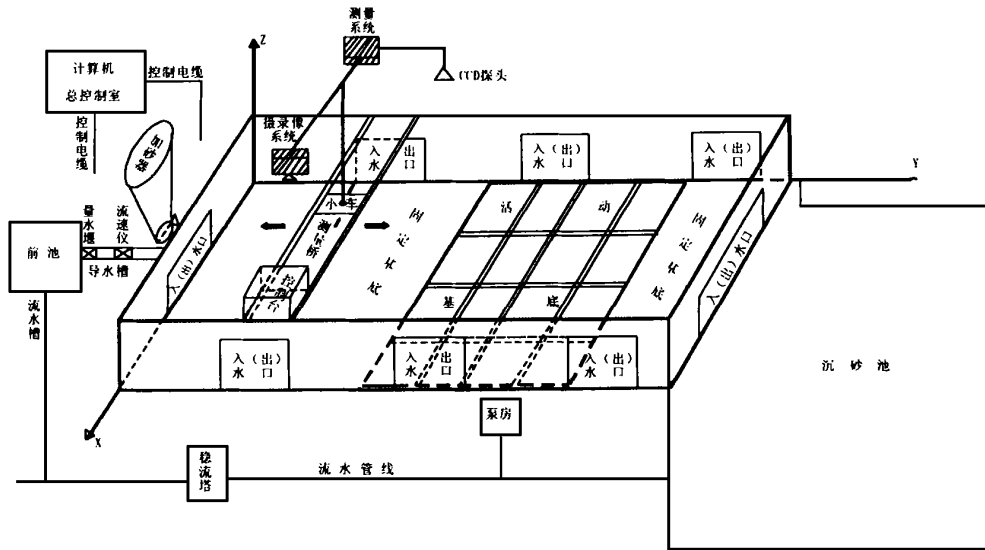


图 1 沉积模拟实验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of sedimentary simulating experiment equipment

表 1 扇三角洲模拟实验设计方案

Table 1 Design plan simulating experiment of fan delta

轮次	时期	流量 $/L \cdot s^{-1}$	加砂量 $/kg \cdot s^{-1}$	加砂组成/%				时间分配 h	活动底板沉降		湖盆水深 $/cm$
				砾 $2 \sim 2.5$ $/mm$	粗砂 $1 \sim 2$ $/mm$	中砂 $0.25 \sim 1$ $/mm$	细砂 $0.1 \sim 0.25$ $/mm$		幅度 $/cm$	速率 $/cm \cdot min^{-1}$	
Run1	枯水	0.3	0.02	0	10	40	50	20	1	0.1	50
	平水	0.9	0.1	10	20	50	20	40	2	0.1	50
	洪水	1.8	0.3	25	40	25	10	20	5	0.2	50
Run2	枯水	0.3	0.02	0	10	40	50	20	1	0.1	40
	平水	0.9	0.1	10	20	50	20	40	2	0.1	40
	洪水	1.8	0.3	25	40	25	10	20	5	0.2	40
Run3	枯水	0.3	0.02	0	10	40	50	20	1	0.1	30
	平水	0.9	0.1	10	20	50	20	40	2	0.1	30
	洪水	1.8	0.3	25	40	25	10	20	5	0.2	30

地质研究中, 河流含砂量参数难以获得, 本模型设计中采用类比法, 参照国内外典型扇三角洲研究成果确定为  $6\% \sim 16\%$  [4, 5, 6, 7, 8], 洪水期含砂量高, 枯水期含砂量低。

构造活动带和断陷湖盆是扇三角洲发育的有利地区, 据此本模型设计活动底板下降总幅度为 24 cm, 分三轮实施, 每轮下降幅度 8 cm, 沉降速率  $0.1 \sim 0.2$  mm/min。

设计连续沉积时间 240 小时, 分三个阶段完成, 有关实验参数见表 1。

## 2 实验现象观察

整个实验过程以阵发性释放水砂为主, 初期出于坡度较陡, 首先在斜坡区形成小型冲积扇(图版 I -1),

并在河口处发生侵蚀, 河口首先展宽, 侵蚀点自河口溯源向上, 直至侵蚀至冲积扇, 河道底蚀严重, 水流在河道底部形成一系列冲坑。放水 24 小时后, 早期冲积扇改造强烈, 自然形成一条切穿冲积扇的辫状河道(图版 I -2)。随着湖盆水位的下降, 上游河道基本稳定, 中下游河道继续展宽, 河道下游形成较为稳定的心滩。

切过冲积扇的辫状河道进入湖盆后, 由于过水断面的增大, 流速锐减, 水流携带泥砂至斜坡脚入湖处形成扇三角洲砂体(图版 I -3), 随着时间的推移, 扇三角洲前缘不断加长加宽增厚, 其表面上分流河道(一般为 2~5 条)左右摆动(图版 I -4), 迁移迅速, 并频繁分叉汇合, 但一般出现一条较为稳定的主分流河道。伴随着分流河道的摆动迁移, 扇三角洲纵向横向不断发育, 分布范围逐渐扩大(图版 I -5), 湖盆水深由 50 cm 降

至30 cm时,扇三角洲形态由长条状逐渐演变为不对称钝弧状(图版I-6),最后变为近对称的弧形朵状体(图版I-7,图2)。

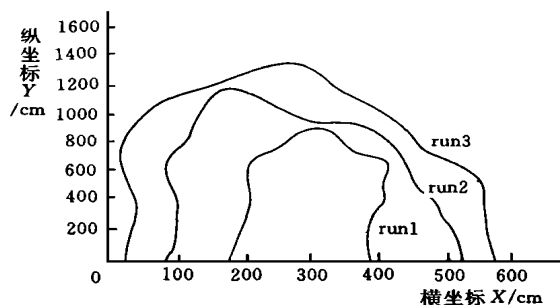


图2 实验结束后,扇三角洲砂体边界图

Fig. 2 Sandbody border plot of fan delta after experimental end

### 3 扇三角洲的搬运沉积过程

实验表明,在湖盆持续下降的背景下,重向上的堆积和平面上的进积是扇三角洲的主要沉积型式。形成扇三角洲的水动力机制主要是突发性洪流与常态水流的不规则交替,但以事件性洪流为主。湖盆侧缘陡坡降与短流程使河流能量高、流域面积小、径流的形成和汇集较快,暴雨时容易形成突发性洪流,尤其是干旱、半干旱气候条件,事件性洪流所占比例更高,而在气候湿润条件下相对较大的河流则存在着近于常态的水流,它们同时影响着扇三角洲的形成过程,因而形成扇三角洲的水动力机制是复合型的,在不同时间和不同位置可以有不同的表现。

断裂升降运动明显时,山前倾斜地带窄,湖盆边缘坡度陡,入湖河流规模小而能量大,物源位置相对固定,物源出口处的冲积扇同滨湖的扇三角洲平原紧密相连,在剖面记录中往往难以将二者截然分开,冲积扇前缘或冲积扇本身就是扇三角洲平原的一部分。

扇三角洲之上的水流形式主要是不稳定的辫状河,流路多变,水流能量大,因而水道中沉积粗大的颗粒,构成砾石坝,坝间是平水时的河道,河间区为瞬时的悬浮质堆积区,随着河道的迁移,悬浮质在剖面记录中保存较少。一次典型的洪水过程,往往依次形成了初期的牵引流沉积→洪峰期的泥石流或碎屑流沉积→退水期的牵引流沉积。

较大的辫状河道得以穿越扇三角洲平原进入湖区,洪水入湖后基本保持原来的流向不变,成为水下辫状河并构成扇三角洲前缘沉积骨架。由于坡度陡和惯性作用,水道沉积特征与扇三角洲平原上相似,既有分选较好、颗粒较细的牵引流沉积,又有混杂的较粗的碎屑流沉积,二者既可是不同性质水流的产物,也可是一

次洪水不同阶段的产物。扇三角洲前缘水道内的沉积亦具有下粗上细的特征,下部分选差为碎屑流沉积的主体部分,属洪峰期沉积,上部粒度变细,分选较好,属于牵引流沉积。水道间因洪水侵溢形成以悬浮搬运为主的较细粒沉积,具有洪水浊流的特征。

洪水抵达较深水湖区后,坡度变缓,水流发散,构成远岸不稳定的网状水流分布带(图版I-8),该带水流能量弱,小水道改道迁移漫溢频繁,水流所具有的空间上的不稳定性 and 时间上短暂性,使得扇三角洲的河口砂坝不发育,形成垂向叠加、侧向交织、砂体广布的圆滑的朵状前缘,这是扇三角洲前缘沉积区水体较深、坡度较陡、水下分流河道快速迁移的结果。

需要说明的是,扇三角洲前缘地带在很漫长的非洪水期,可以形成广布的薄层粉砂和泥层,但一般保持时间较短,极易受到下次洪水的冲刷切割,有时前次洪水后期沉积物也同时遭到冲刷。

实验过程中前扇三角洲主要以悬浮物质沉积为主,由于水体相对较浑浊,不易观察其动力过程,但沉速相当缓慢,经过三轮实验后,粉砂质泥层的厚度仅2.1 cm。

### 4 沉积演化特征

扇三角洲的沉积演化包括两个方面,其一是扇三角洲上辫状河道的演化,其二是扇三角洲本身的演化,前者是导致后者变化的内在因素。

#### 4.1 辫状河道的演化过程分析

原始河道在经过5个小时的冲刷后,明显具有辫状河道的特征,之所以如此,分析认为有两个原因,首先底床坡降大,切割能力强;其次随着基准面下降,河道向前延伸,水流挟砂能力减弱,不足以将上游来砂全部带入湖区,从而在河道中形成相对稳定的心滩,进而促使水道分汊明显,河道宽浅。在实验中分别统计了平均流速 $V$ 、平均河宽 $W$ 、平均下切深度 $H$ 、河床平均展宽速率 $V_W$ 、平均下切速率 $V_H$ 以及河岸平均坡角 $\bar{\alpha}_1$ 、 $\bar{\alpha}_2$ (表2)。随着实验的进行,坡度减小, $V$ 逐渐减小, $W$ 逐渐增大, $H$ 加大,但 $V_H$ 在逐渐减小。上述参数的变化特征说明,随着基准面下降,在其它条件不变情况下,形成辫状河的水动力条件在减弱,从而导致扇三角洲前缘形态钝化。另外,实验中自然形成辫状河的河岸倾角均较大,这与辫状河的底蚀作用比较强,河岸崩塌严重有密切关系。

随着基准面的下降,河床中沉积厚度差异较大。由于水流的搬动能力与流速的大小呈正比。随着坡降低,流速逐渐减小,水流的搬运能力随之减弱,加上上游加砂与河岸侵蚀使得下游物源增加,超过水流搬

运能力,因此造成河床抬高的现象,但辫状河床的游高并不是全断面等量均匀的<sup>[9]</sup>(图 3)。

表 2 水流速度及砂体展布

Table 2 Velocity of flow and sandbody distribution

轮次	$V$ / $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$W$ /cm	$H$ /cm	$V_W$ / $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	$V_H$ / $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$	平均坡度(°)	
						左侧 ( $\alpha_1$ )	右侧 ( $\alpha_2$ )
Run1	44.2	131	6.4	3.7	0.9	27.2	28.4
Run2	37.3	173	4.3	2.2	0.2	29.5	26.4
Run3	34.7	186	3.6	1.7	0.08	26.2	27.5

从扇三角洲纵剖面(图 4)可以看出,扇三角洲上每轮辫状河道自上游至下游的坡降基本与原始坡降大致相当,并且平行与水面坡降。这表明尽管每期辫状河道开始形成时,其沉积条件可能存在差别,但随着沉积作用的进行,扇三角洲上的辫状河道经历了不稳定→稳定的缓慢变化过程。这种相对稳定状态的标志是地形坡降与水面坡降一致、侵蚀作用与沉积作用达到平衡状态、泥砂在扇三角洲辫状河道中仅仅是路过但不留下任何地层记录。同时,每次构造运动(实验中活动底板的升降)是导致扇三角洲上辫状河道迁移改道的根本内在原因,构造运动的强烈期→微弱期的变化过程也正是扇三角洲上辫状河道从不稳定→稳定的过程,这两个过程的变化速率近似呈正比(图 5)。

砂体剖面分析与实验过程的观察对比表明,扇三角洲上辫状河道的迁移方向与洪水期水流动力轴线的变迁密切相关(图版 I-9)。run1 洪水期,水流动力轴线位于扇三角洲的右侧,则剖面上主砂带(主辫状河道)亦呈长条状位于扇三角洲的右侧;run2 洪水期,水流动力轴线位于扇三角洲的中偏左侧,主砂带呈钝舌状分布于相应位置;run3 洪水期,主水流动力轴线不明显,水流呈强片流态势,砂体呈扁平状全方位向前推进,主砂带分布不明显。

#### 4.2 扇三角洲的演化过程分析

实验发现,扇三角洲的演变是其上辫状河道迁移的必然结果(图版 I-10),二者之间呈制约与被制约的关系。扇三角洲的演化过程具有以下特征:

(1) 生长速率逐渐变小。随着沉积作用的进行,扇三角砂体纵向( $Y$  方向)不断伸长,但伸长速率逐渐变小,平均由 7.46→2.89→1.23,砂体横向( $X$  方向)不断展宽,但展宽速率逐渐减小,平均由 5.73→3.26→2.57,同一时期内,展宽速率大于伸长速率(run1 除外),且二者的比值也逐渐增大。此种结果的出现乃是由于基准面的下降,扇三角洲在纵横向上不同步发育,以横向展宽为主。同时,扇三角洲达到平衡时,沙面坡降、河床坡降与水面坡降相协调,因此扇三角洲的平均

厚度变化很小。面积的不断增大使得过水断面增大,水流平均速度变小,由此导致水流搬运能力减弱,而每轮实验中供应沉积物的总量大致是相等的,只有减缓伸长速率和展宽速率才能保证沉积物的分配。另一方面,由于实验初始阶段,砂体从无到有,水流速度大,沉积物供应不仅有上流来砂,而且有切割河岸形成的。因此砂体纵向变化较快。但随着沉积作用的进行,扇三角洲的范围在增大,而原始坡降的存在又使扇三角洲的前端水体较深,而侧向水深较浅,为了减小湖水的顶托阻力,河道以向两侧摆动为主,导致扇三角洲的展宽速率较大。

(2) 扇三角洲的形态主要受湖水深度、入湖坡降,辫状河道的形态、流量变化率以及粒径大小支配。

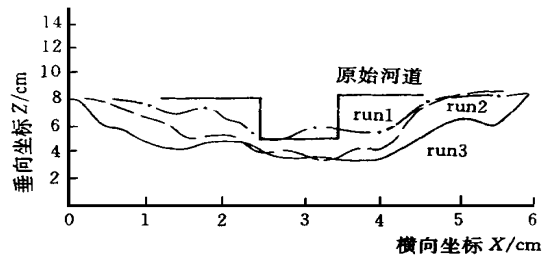


图 3  $Y=600$  cm 辫状河道横剖面图

Fig. 3  $Y=600$  cm Cross profile plot of braided river course

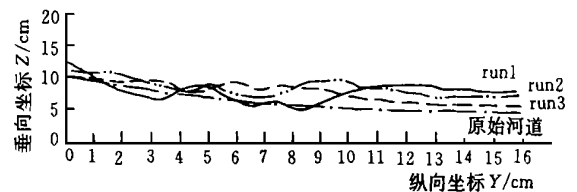


图 4  $X=300$  cm 辫状河道纵剖面图

Fig. 4  $X=300$  cm Portrait profile plot of braided river course

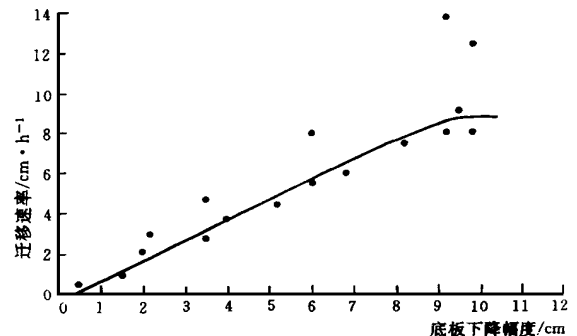


图 5 活动底板下降幅度与辫状河道迁移速率的关系

Fig. 5 The relation of decline of activity backplane and removal tempo of braided river course

第一,对于每轮实验而言,扇三角洲的长/宽均大于1,而宽厚比一般小于50,这表明由于湖水深度较大,使得扇三角洲的厚度较大,较小的宽厚比说明扇三角洲具有舌状特征<sup>[10]</sup>;第二,入湖坡度的大小直接控制着扇三角洲上辫状河道的延伸距离,两者之间呈反比关系,入湖坡度由大变小的过程,也是扇三角洲由舌状向鸟足状演化的过程;第三,宽/深较小的辫状河道具有较强的喷射能力,使得扇三角洲的平面形态变化较快,反之,宽/深较大的辫状河道具有宽而浅的特点,扇三角洲的形态变化较慢,且多呈钝舌状;第四,流量变化率越大的沉积过程,扇三角洲伸长速率和展宽速率均较大,尤其是展宽速率变化更显著(图6),反之扇三角洲的演变过程就较缓慢;第五,粗粒的扇三角洲分布范围较局限,而且厚度较大,这是由于水动力条件的细微变化对粗粒影响明显的缘故。

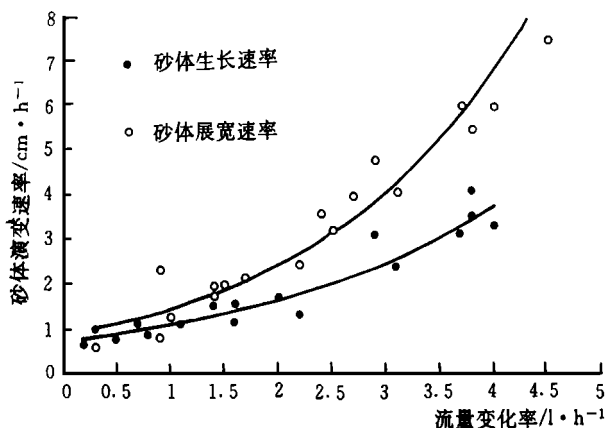


图6 流量变化率与砂体演变速率的关系

Fig. 6 The relation of flow rate change rate and sandbody evolution tempo

(3) 扇三角洲的边缘倾角及稳定性是湖泊水体深度的函数。边缘倾角在扇三角洲的前方称前缘倾角,在其侧缘指侧缘倾角。随着湖泊基准面的下降,前缘及侧缘倾角都有减小的趋势,但后者的减小更明显。由于扇三角洲前缘比侧缘水深大,前缘阻力也较大,所以每轮实验中前缘倾角一般比侧缘倾角大。当前缘倾角达到 $33^\circ$ 时,扇三角洲前缘的稳定性遭到破坏,将产生水下塌,形成沉积物重力流,在深湖区产生滑塌浊

积岩。扇三角洲的侧缘倾角一般达不到休止角,因此扇三角洲的侧缘是稳定的。

(4) 平面上扇三角洲具有平原粗、前缘细的总体特征,但每一期扇三角洲的沉积演变则比较复杂。因为扇三角洲的形成是一个以突发性为主的沉积过程,粗粒扇三角洲更是如此,洪水流对扇三角洲的形成起着决定性作用。模拟实验及自然界中的洪水过程都具有由小到大再变小的规律,洪水期水流速度大,流量大,水动力条件强,携带的粗粒沉积物可以直达扇三角洲前缘。而在流量逐渐减小,洪水逐渐退去的过程中,水动力条件较弱,物源中的粗粒物质难以被搬运,同一沉积期内扇三角洲平原上则沉积细粒物质。因此扇三角洲每一期沉积过程中,自上游至下游,粒度的演变具有细→粗→细的变化规律,最粗的颗粒分布在扇三角洲前缘上部湖岸线向湖一侧。持续的基准面下降过程和反复的洪水作用才使得扇三角洲具有向上变粗的特征。

#### 参 考 文 献

- 1 吴崇筠,薛叔浩等.中国含油气盆地沉积学[M].北京:石油工业出版社,1992.56~60
- 2 Rebecca J Doney, et al, Rapid Subsidence and Stacked Gilbert-type fan Deltas, Pliocene Loreto basin, Baja California, Sur, Mexico[J]. Sedimentary Geology, 1995, 98: 181~204
- 3 Paul Weimer. Sequence Stratigraphy, Facies Geometries, and Depositional History of the Mississippi fan, Gulf of Mexico[J]. AAPG, 1990, 74(4): 425~453
- 4 Begg S H. Characterization of a complex fluvial-deltaic reservoir for simulation[J]. SPE Formation Evaluation, 1996, 11(3): 147~154
- 5 Schumm S A, Khan H R. Experimental study of channel pattern[J]. Bull. Geol. soc. Am. 1972, 83: 1755~1770
- 6 张春生,杨亚洲.洱海西岸辫状三角洲沉积[J].江汉石油学院学报, 1994, 16(4): 28~34
- 7 赵霞飞.动力沉积学与陆相沉积[M].北京:科学出版社,1992.166~204
- 8 Keyu L. Submarine of features of modern open-sea fan deltas, Huon peninsula, Papua New Guinea[J]. Sedimentary Geology, 1995, 98(1): 63~77
- 9 张春生,刘忠保.现代河湖沉积与模拟实验[M].北京:地质出版社,1997.172~176
- 10 张春生,刘忠保,曹跃华等.歧北凹陷舌状砂体沉积模拟实验[J].石油与天然气地质,1995,16(2): 178~184

# Formed Proceeding and Evolution Disciplinarian of Fan Delta

ZHANG Chun-sheng<sup>1,2</sup> LIU Zhong-bao<sup>2</sup> SHI Dong<sup>2</sup> JIA Ai-lin<sup>3</sup>

1 (Department of Petroleum, Chendu College of Technology, Chendu Sichuan 610059)

2 (Jiangnan Petroleum Institute, Jingzhou Hubei 434102)

3 (Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083)

## Abstract

Formed proceeding and evolution disciplinarian of fan delta are studied in detail using experimental sedimentary. It points that formed of fan delta dues to alternating function of spasmodic flooding and usually flowing. Debris flood and mud-rock flow are mainly sedimentary at flooding period, tractional current is main as a rule. In course of continuing of sedimentary, formed of fan delta is increasing out of sync in plane and rate of stretch is larger than rate of elongation in the course of declining of datum plane. Formed of fan delta is smooth tongue in the edge of delta. Removing and waver of braided river course leads to evolution disciplinarian of fan delta. Tectonic motive intensification is similar positive correlativity with removing and waver of braided river course. Deep of lake, slope of accessing lake, formed of braided river course, flow change rate and grain size are importance agent that affecting evolution of fan delta.

**Key words** simulate experiment formed course evolution disciplinarian fan delta

## 图版说明

图版 I 1. 实验进行 8 小时 30 分钟后, 在  $y=4\sim 7\text{ m}$  的入湖斜坡区形成小型冲积扇, run1 枯水期照片; 2. 实验进行 16 小时 20 分钟时, 早期冲积扇受到强烈改造, 在冲积扇右侧(从上游向下游观察, 下同)形成辫状河道, run1 枯水期照片; 3. 实验进行 40 小时 25 分钟后, 在  $y=8\sim 10\text{ m}$  处形成的扇三角洲砂体, run1 中水期照片; 4. 实验进行 72 小时后, 在扇三角洲上形成三条主要辫状河道, 这些辫状分流河道持续时间短, 迁移速度快, run1 洪水期照片; 5. 随着实验进行, 扇三角洲砂体逐渐发育, 几乎充填整个湖区, 实验进行 177 小时 15 分钟时 run3 枯水期照片; 6. 实验进行 161 小时 50 分钟时, 扇三角洲砂体偏向右侧, 呈现钝弧状分布, run3 枯水期照片; 7. 实验进行 212 小时 48 分钟时, 扇三角洲前缘呈近对称的朵状分布, run3 中水期照片; 8. 经过沉积作用调整后, 斜坡区坡度很小, 在  $y=11\sim 13\text{ m}$  远岸处形成的网状分流, 实验进行 231 小时 run3 洪水期照片; 9. 水流动力轴线的改变(由左→右)导致主辫状河道亦由左向右迁移, 实验进行 148 小时 12 分钟 run2 洪水照片; 10. 辫状河道的分布及演变决定了扇三角洲朵体的分布及演变, 照片显示三条主要辫状河道形成三个新的扇三角洲朵体, 实验进行 155 小时 27 分钟时 run2 洪水期照片。

