

文章编号: 1000-0550(2006)01-0050-06

# 三角洲前缘滑塌浊积体形成过程模拟<sup>①</sup>

张关龙<sup>1</sup> 陈世悦<sup>1</sup> 鄢继华<sup>1</sup> 姜在兴<sup>2</sup> 宋国奇<sup>3</sup> 邱桂强<sup>3</sup>

(1 中国石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061; 2 中国地质大学能源地质系 北京 100083

3 中国石油化工股份有限公司胜利油田地质院 山东东营 257015)

**摘要** 三角洲前缘滑塌浊积体是断陷盆地内一类重要的岩性油气藏。通过室内水槽实验模拟了不同条件下三角洲前缘滑塌浊积体的形成过程。实验结果表明,触发机制是三角洲前缘发生滑塌和形成浊积体的前提,它包括地震、波浪等外界触发机制,也包括前缘砂体自身重力所产生的压实沉降等。其中地震作用可以破坏三角洲前缘的稳定性,形成液化滑塌浊积体和断阶滑塌浊积体。波浪作用可以侵蚀浪基面附近的三角洲前缘砂体,并在回流作用下携带至最大浪基面之下再沉积,沉积过程中形成小型浊积体。无外界触发机制作用下主河道入水口处的砂体在重力作用下向下部泥岩压实沉降,也可形成滑塌浊积体。浊积体迁移的动力主要是滑塌砂体自身的重力,其中的断阶滑塌浊积体还受到后续叠置体的碰撞力,因此其可以移动更远的距离。

**关键词** 三角洲前缘 滑塌浊积体 水槽实验 地震作用 波浪作用

**第一作者简介** 张关龙 男 1980 年出生 在读博士研究生 沉积学

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 1 引言

随着我国东部油区勘探程度的不断深入,油气勘探重点也由构造油藏转向岩性油藏,而三角洲前缘滑塌浊积体作为断陷盆地内岩性油气藏的一种重要类型,已经引起石油地质工作者们的广泛重视<sup>[1~4]</sup>。就我国东部渤海湾盆地内的东营凹陷而言,目前已发现上百个与三角洲前缘滑塌有关的浊积砂体,探明地质储量近千万吨<sup>[5]</sup>,这些滑塌浊积体呈马蹄形分散或成带分布在东营三角洲砂体前方<sup>[6]</sup>,垂向叠置,横向连片,大小不一,形态各异<sup>[7]</sup>。但由于目前对该类浊积体形成过程和机制的研究仍处于探索之中,还无法明确其发育规律及分布特征,严重制约了对该类油气藏的勘探和预测。本文试图通过物理模拟的手段来研究三角洲前缘滑塌浊积体的形成过程,从而为人们正确认识该类浊积体提供理论依据。

通过先导模拟实验,我们已经证实了滑塌浊积体室内实验模拟的可行性<sup>[8]</sup>,并初步总结出四种滑塌浊积岩类型,即无外界触发机制的天然重力滑塌、地震诱发作用产生的滑塌、波浪作用产生的滑塌和与底形相关的砂岩透镜体。为了弄清滑塌浊积体的具体形成过程,我们以先导实验为基础,在室内大型水槽

内进行了三角洲及其前缘滑塌浊积体形成过程的物理模拟实验。

## 2 水槽实验装置及模拟方案

### 2.1 实验装置

模拟实验是在一个内壁长 5 m、宽 2 m、高 1 m 的室内水槽内进行的,水槽长轴侧壁为玻璃,便于观察和照相。短轴侧壁及底面均为厚 25 cm 的水泥壁,整个水槽置于高 40 cm 的底座之上。短轴侧壁一端装有进水口,另一端装有出水口,进水口处外接一加砂槽,沉积物与水同时由加砂槽注入水槽。水槽内放一活动金属支架,支架表面铺设铁板,用来模拟原始底形。通过升降控制杆可调节底形坡度。支架上固定一金属管,作为震源触发点,通过施加外力敲击金属管模拟震动的发生(图 1,图版 I-1)。

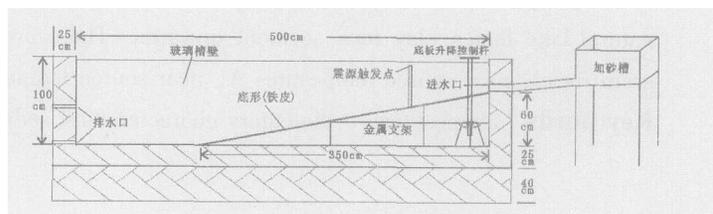


图 1 水槽模拟实验装置剖面图

Fig 1 Section map of flume experiment equipment

① 国家十五科技攻关项目(项目编号: 2001BA605A09)资料。  
收稿日期: 2005-01-11; 收修修改稿日期: 2005-04-13

## 2.2 模拟方案设计

实验共分三组进行, 分别用来观察地震作用下、无外界触发机制作用下以及波浪作用下三角洲前缘的变化过程和滑塌浊积体的形成。每组实验水流流速和加砂速度都基本保持不变, 通过改变排水速度来控制槽内水体的深度变化。外界触发机制的模拟是在三角洲砂体沉积形成之后, 通过铁锤的自由落体运动敲打震源触发点来模拟地震; 通过外界容器在水槽末端水体中的上下起伏产生波浪。结合前人的研究经验<sup>[9-10]</sup>以及东营三角洲的实际情况和实验条件的限制, 模拟实验各参数见表 1。

表 1 水槽实验各参数统计表

Table 1 The parameters of flume experiments

实验	触发机制	实验时间 min	池内水深变化 /cm	流量 (ml/s)	总加砂量 /kg	注入沉积物组成 %					底形坡度
						粗砂	中砂	细砂	粉砂	粘土	
一	地震	1027	23.5~41~31.5	41.7	480	18.9	4.5	6.3	2.6	3.4	4.9°
二	无	1446	40	41.7	730	0.5	4.2	9.9	30.4	3.4	3.9°
三	波浪	1446	40	41.7	730	0.5	4.2	9.9	30.4	3.4	3.9°

## 3 滑塌浊积体形成过程

实验结果表明, 三角洲前缘产生滑塌的充要条件是一定的触发机制。触发机制可以是外界的, 例如地震作用、波浪作用等; 也可以是内在的, 如三角洲前缘砂体自身重力所产生的压实沉降等。在不同机制作用下, 滑塌浊积体的形成过程和分布规律都有较大的差异性。

### 3.1 地震作用下形成的滑塌浊积体

地震作用是一种最直接的, 也是最频繁的外界机制, 它不但可以产生断层、形成沟谷, 还可以诱发产生崩塌和滑坡。在断陷盆地中地震活动尤其频繁。

模拟实验首先在底形上沉积形成一个延伸距离长 2.7 m 的三角洲沉积体 (图版 I-2), 待池内水体澄清后, 将 24 磅的磅锤抬高 0.5 m, 让其自由落体, 敲打震源触发点, 至三角洲前缘产生明显滑塌时共敲击 20 下, 历时 40 秒。在地震作用下, 三角洲前缘发生液化滑塌和断阶滑塌两种类型的滑塌, 形成三种类型的滑塌浊积体, 可明显观察到 7 个泥质沟道—浊积体系。它们分布在不同区带内, 在三角洲前缘形成了广泛发育的滑塌浊积体系。

#### 3.1.1 液化滑塌浊积体

在靠近震源一侧, 由于受到的震动作用比较强烈, 三角洲前缘发生强烈液化, 整体塌陷前移。在液化体前方可形成小型浊积体, 浊积体的物源来自泥质沟道初始端下部的砂质沉积, 它们在液化作用下上涌至表面, 然后在重力作用下沿着底形斜坡下倾方向迁移, 移动过程中同时携带了表面的泥质沉积和水形成砂泥水的混合物, 移动一定距离后沉积下来形成浊积体。这种浊积体往往分布在前缘斜坡与底形坡折的中央部位, 规模小、物性差。底形斜坡的存在是其迁移和沉积的重要前提。

#### 3.1.2 断阶滑塌浊积体

在远离震源一侧, 基底的震动使得三角洲前缘局部形成近于垂直的断阶 (图版 I-3 I-4)。断阶上部断开了三角洲体上部的顶积层, 下部则沿着前积层层理发育。断阶之上的沉积物在重力的作用下顺着前缘斜坡向下滑动, 先在坡脚处的较深水区分别形成对应的一级滑塌砂体。随着震动的继续, 一级滑塌体前方的局部砂体会突然脱离主滑塌体而向深洼陷移动和沉积, 在深洼陷内形成孤立的二级滑塌浊积体 (图版 I-5)。

三角洲前缘实际上是由多个相对独立的前积体组成。地震作用产生的断阶可断掉前缘的多个前积体, 使其成为滑塌浊积体的物源。不同位置的前积体具有不同的势能, 滑动过程中由于各单层前积体滑动次序的不同和速度的差异, 使得这些前积体互相叠置, 在自身重力作用下下滑的同时也受到了后续滑塌前积体的推挤。滑塌初期, 这些叠置体作为一个整体沿着斜坡面向下滑动, 到达坡脚后速度逐渐减慢。连续震动过程中的一次强震形成新的叠置体, 它以较高的速度沿斜坡面下滑并撞击早期形成的叠置体, 最前方的叠置体在碰撞力的作用下就会脱离整体而向深洼处移动。这就像连珠相撞一样, 相互靠着的一排圆球, 如果撞击最后一个, 则只有最前面的那个被撞出去, 而其它的球仍然靠在一起不动。当再一次出现强震时, 后方叠置体的撞击力会使前方第二个叠置体脱离群体, 形成一个新的浊积体或与第一个叠置体相接触组成复合浊积体沉积 (图 2)。

二级滑塌浊积体发育规模较大、移动距离远、物性相对较好, 且多分布在深洼陷内部, 具有良好的生储盖条件, 往往是隐蔽油气藏勘探的有利目标。

此外, 在一级滑塌体内部的前缘或侧缘还发育另外一种浊积体, 它们规模很小, 移动距离短, 其产生滑塌的部分并不是三角洲前缘的一个前积体, 而是一级

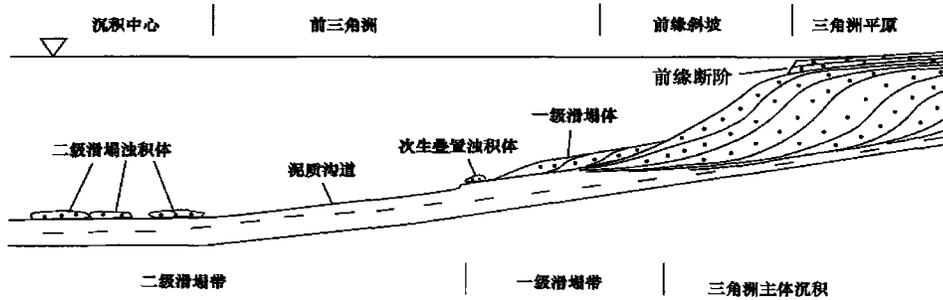


图 2 三角洲前缘断阶滑塌浊积体系剖面分布示意图

Fig 2 Section image showing faulted fluvial turbidite system in front of delta

滑塌体在迁移过程中新形成的小型浊积砂体,也可以将其称为次生叠置浊积体。它们在重力作用下沿着底形斜坡的下倾方向移动,形成小型的泥质沟道—浊积体系。这种浊积体多在前缘斜坡坡脚处沉积,很难与一级滑塌体区分开,因此不将其作为有利勘探目标。

总的来说,二级滑塌浊积体规模较大,最大可达  $30\text{ cm} \times 18\text{ cm}$ ,最小也有  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  大小。两个液化滑塌浊积体较小,大的为  $6\text{ cm} \times 4\text{ cm}$ ,小的为  $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ 。两个次生叠置滑塌浊积体面积也很小,都在  $3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$  左右。二级滑塌体的泥质沟道最长可由前缘斜坡根部延伸至水槽顶端,长达  $100\text{ cm}$ ,短的也有  $30\text{ cm}$  长(次生叠置体除外)。沟道的宽度一般与浊积体大小有关,浊积体越大沟道越宽。

### 3.2 无外界触发机制下形成的滑塌浊积体

无任何外界触发机制作用下,三角洲前缘滑塌浊积体产生的根本原因是前缘砂体的压实沉陷作用。前缘主水道入水口处的砂体在自身重力作用下向下部泥岩压实沉陷,从而导致三角洲前缘局部位置的滑塌,并进一步产生远距离搬运的浊积砂体。

三角洲平原分支河道的改道是很频繁的,也是三角洲不断发育生长的主要方式。在河道间歇期三角洲平原以漫流沉积为主,不发育主河道,大量的泥质沉积物被带入前缘的湖盆中。由于泥质浊流的搬运距离比较远,在三角洲前缘会形成较厚的、表面平直的泥岩,它直接覆盖在前缘斜坡底部之上。该层泥岩未固结,而且饱含水,一旦上部有物质沉积,则处于欠压实状态,因此是无触发机制作用下三角洲前缘发生滑塌的重要前提。

在主河道发育期,大量的砂质沉积物经河道搬运至三角洲前缘,形成具有固定前缘斜坡的前积体。这组前积体直接形成在河道间歇期的泥岩之上,当其规模和沉积厚度达到一定时,其自身的重力开始大于下

部泥岩的承受能力,这时前缘会产生一条高角度的正断层(图版 I-6),断层上盘的砂岩前积体在自身重力的作用下滑塌沉陷,取代下部的泥岩沉积,并迫使泥岩向下坡方向推移。同时,砂岩前积体滑塌后,前缘斜坡的坡度变得平缓,砂岩可沿泥质沉积物表面滑移更远的距离,滑塌砂体规模越大则移动的越远。这些砂体其重量同样对下部的泥岩是超载的,因此沿着滑塌砂岩的分布可形成多条同生正断层,各断层下降盘的砂岩随着主滑塌的继续同样也发生滑塌和变形,在移动过程中形成火焰构造、揉皱构造等各种变形构造,砂泥接触面上还可以形成重荷模等反应重力流沉积的标志。泥岩的揉皱变形使得原来就被断层断开的滑塌砂体变得更加孤立,在三角洲前缘形成一系列孤立的浊积体。同时,由于饱含水的泥岩在上部沉积物的重力作用下还可以发生液化现象,使得主砂体前方本来就已经发生变形的区域变得更为复杂。

由于底形坡度的存在,滑塌砂体以及液化形成的砂、泥、水混合浊流在重力的作用下会沿着底形滑动,冲蚀出一条近于垂直岸线的深水沟道,沉积物沿着沟道缓慢移动和沉积。其中的砂质沉积物在移动过程中会先沉积下来,沿着沟道形成断续相连或孤立的小型浊积砂体。在底形的坡折处,由于重力作用的消失以及砂质沉积物含量的减少,剩下的泥质沉积物失去了迁移的动力而在坡折附近发散,形成舌形发散体(图 3)。

河道发育期过后,整个前缘剖面继续接受泥质沉积,并随时恭候下一期主河道的来临。而下一期主河道同样会发生这样的变化。同时,后一组塌陷还可以将前一组已经或几乎已经孤立的砂岩体向湖盆方向推挤,在离母源区更远的地方保存下来(图版 I-7)。多期的压实沉陷作用使得该类浊积体分布更复杂。早期压实沉陷形成的深水沟道内的浊积体,甚至早期

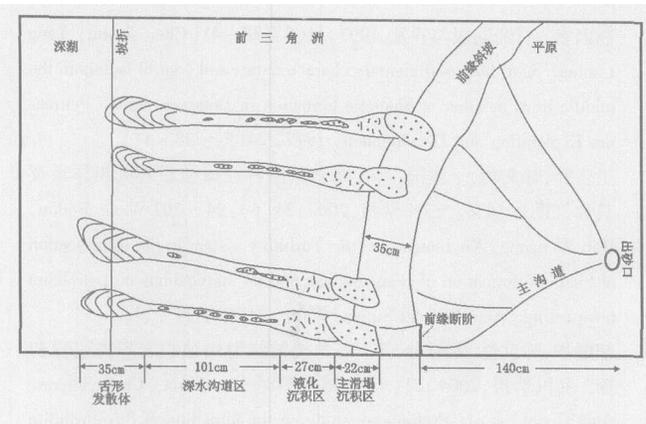


图 3 无外界触发机制下三角洲前缘滑塌体系平面分布图

Fig 3 Plane view showing turbidite systems in front of delta without trigger mechanism

的主滑塌砂体也可能被逐步孤立在后缘三角洲下面(图版 I-8)。

### 3.3 波浪作用下形成的浊积体

波浪对湖岸有较强的侵蚀作用。断陷盆地内构造的频繁活动不仅会产生强烈的地震,而且会搅动湖盆内水体引起湖啸,所形成的波浪可以破坏和改造三角洲前缘,进而诱发形成浊积砂体。这类浊积体不是滑塌成因的,而是前缘砂体再沉积的产物。

波浪作用的模拟是在实验二基础上进行的,待水体澄清后在水槽末端的中央位置通过容器在水中的上下起伏来制造波浪,造波时间 4 分钟,平均波高 8 cm。

在波浪作用下,岸线附近的沉积物被波浪搅起,形成浊流,并被波浪的回流作用携带至湖盆内部,在最大浪基面以下接受再沉积(图版 I-9)。静水面与最大浪基面之间的前缘沉积被波浪的回流作用带走后,在三角洲前缘形成一个环带状的液化区。液化区是一个平坦的沉积区,由于该区上部的原始沉积物被波浪回流作用带走,下部富含水的砂、泥岩因上部压力的突然消失而涌上地表,形成砂火山、泥火山等液化现象,最后液化区的砂岩沉积表面被泥岩所覆盖,并显示出明显的区带性(图版 I-10)。

波浪回流作用所携带的沉积物在三角洲前缘斜坡脚的再沉积是进一步形成三角洲前缘浊积体的重要前提。前缘坡脚处沉积的砂岩在重力作用下沿着三角洲前缘的底形斜坡进一步向前移动,形成指状砂体(图 4)。这些指状砂体根部与坡脚沉积的主砂体相连,向深湖方向指状变窄。指状砂体在移动过程中能量逐渐减弱,指根砂体受主砂体的牵引会很快停止

移动,而指尖砂体在重力和惯性力的作用下会沿着底形斜坡继续移动,直至其能量全部消失,在前缘形成孤立的浊积砂体(图版 I-11)。

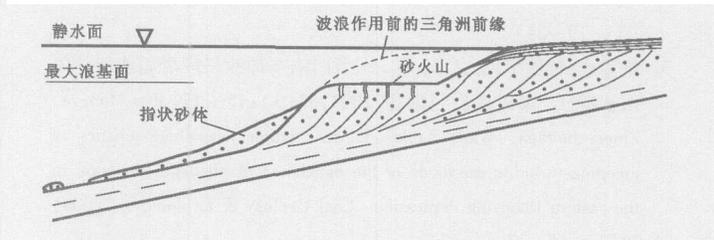


图 4 三角洲前缘波浪改造示意图

Fig 4 Sketch map of delta front after wave action

这种浊积体是以块体流的形式迁移的,由于没有后续能量的补充,其迁移动力很快消散,因此并不会移动很远的距离。此外,指尖砂体规模太小也可能是它移动距离不远的原因之一,这就导致了实际勘探中很难将该类浊积体与三角洲主砂体区分开。

波浪作用形成的浊积体规模小,数量少,且靠近三角洲主砂体。实验中只有一个指状砂体形成的浊积体最为明显,形成两个小型孤立的浊积体,前方的浊积体大小为  $2\text{ cm} \times 3\text{ cm}$ ,距坡脚主砂体 55 cm 远(泥质沟道的距离);后方浊积砂体相对较大,有  $3\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  大小,距坡脚主砂体 30 cm 远,泥质沟道宽为  $2\text{ cm} \sim 3\text{ cm}$ 。

## 4 结论

室内沉积物物理模拟具有一定的局限性,但却可以使我们对三角洲前缘滑塌浊积体的形成过程有更直观的认识。实验结果表明,三角洲前缘在地震、波浪以及无任何外界触发机制作用下都可以发生滑塌,形成相应的滑塌浊积体。其中波浪和无触发机制作用下形成的浊积体主要分布在底形斜坡上,移动距离短、规模小;而地震作用下形成的浊积体在三角洲前缘广泛发育,尤其是断阶滑塌形成的二级滑塌浊积体分布在深洼陷内,沉积规模大,是隐蔽油气藏勘探的有利目标之一。

### 参考文献 (References)

- 1 赵密福,信荃麟,刘泽容.惠民凹陷临南洼陷滑塌浊积岩的分布规律及其控制因素.石油实验地质,2001,23(3):267~271 [Zhao Mi-fu, Xin Qu-an-lin, Liu Ze-rong. Distribution rules of flux turbidite in the Linnan sag of the Huimin depression and their control factors. Petroleum Geology & Experiment 2001, 23(3): 267~271]
- 2 严进荣,陈东,郭勤涛,等.洼陷中浊积岩沉积特征及油气富集规

- 律研究. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(3): 19~24 [Yan Jirong, Chen Dong, Guo Qintao *et al*. Sedimentary characteristics of the turbidites and oil and gas accumulation in the secondary depressions in the eastern China. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2002, 22(3): 19~24]
- 3 饶孟余, 钟建华, 王夕宾, 等. 东营凹陷东部沙三段滑塌浊积砂体沉积特征. 煤田地质与勘探, 2004, 32(3): 15~17 [Rao Mengyu, Zhong Jianhua, Wang Xibin *et al*. Sedimentary characteristics of creeping turbidite sandbody of the member 3 of Shahejie formation in the eastern Dongying depression. *Coal Geology & Exploration*, 2004, 32(3): 15~17]
- 4 饶孟余, 钟建华, 王海桥, 等. 山东东营牛庄洼陷沙三中亚段浊积砂体储层特征及影响因素. 现代地质, 2004, 18(2): 256~262 [Rao Mengyu, Zhong Jianhua, Wang Haiqiao *et al*. Reservoir characteristics and influence factors of the turbidite sandbody Shasan in intermediate member in the Niuzhuang sag, Dongying depression, Shandong province. *Geoscience*, 2004, 18(2): 256~262]
- 5 高永进, 邱桂强, 陈冬霞, 等. 牛庄洼陷岩性油藏含油气性及主控因素. 石油与天然气地质, 2004, 25(3): 284~287 [Gao Yongjin, Qiu Guiqiang, Chen Dongxia *et al*. Oil/gas shows in lithologic reservoirs in Niuzhuang sag and their main controlling factors. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(3): 284~287]
- 6 陈嘉树, 杨立明. 东辛地区沙河街组三段中部砂体沉积特征及控制因素. 石油勘探与开发, 1997, 24(5): 38~41 [Chen Jiashu, Yang Liming. Sand body sedimentary characteristics and control factors in the middle third member of Shahejie formation in Dongxin region. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 24(5): 38~41]
- 7 王金锋, 韩文功, 于建国, 等. 东营凹陷沙三段浊积岩沉积体系及其油气勘探意义. 石油学报, 2003, 24(6): 24~29 [Wang Jinfeng, Han Wengong, Yu Jianguo *et al*. Turbidity system in the third section of Shahejie formation of Dongying sag and its implications on petroleum prospecting. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(6): 24~29]
- 8 鄢继华, 陈世悦, 宋国奇, 等. 三角洲前缘滑塌浊积岩形成过程初探. 沉积学报, 2004, 22(4): 573~578 [Yan Jihua, Chen Shiyue, Song Guoqi *et al*. Preliminary study on the formation of fluxoturbidite in front of delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 573~578]
- 9 赖志云, 周维. 舌状三角洲和鸟足状三角洲形成及演变的沉积模拟实验. 沉积学报, 1994, 12(2): 37~44 [Lai Zhiyun, Zhou Wei. Experimental formation and development of lobate and birdfoot deltas. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(2): 37~44]
- 10 刘忠保, 赖志云, 汪崎生. 湖泊三角洲砂体形成及演化的水槽实验初步研究. 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 sandbody. *Experimental Petroleum Geology*, 1995, 17(1): 34~41]

## Simulation of Fluxoturbidite in Front of Delta

ZHANG Guanlong<sup>1</sup> CHEN Shiyue<sup>1</sup> YAN Jihua<sup>1</sup>  
JIANG Zaixing<sup>2</sup> SONG Guoqi<sup>3</sup> QIU Guiqiang<sup>3</sup>

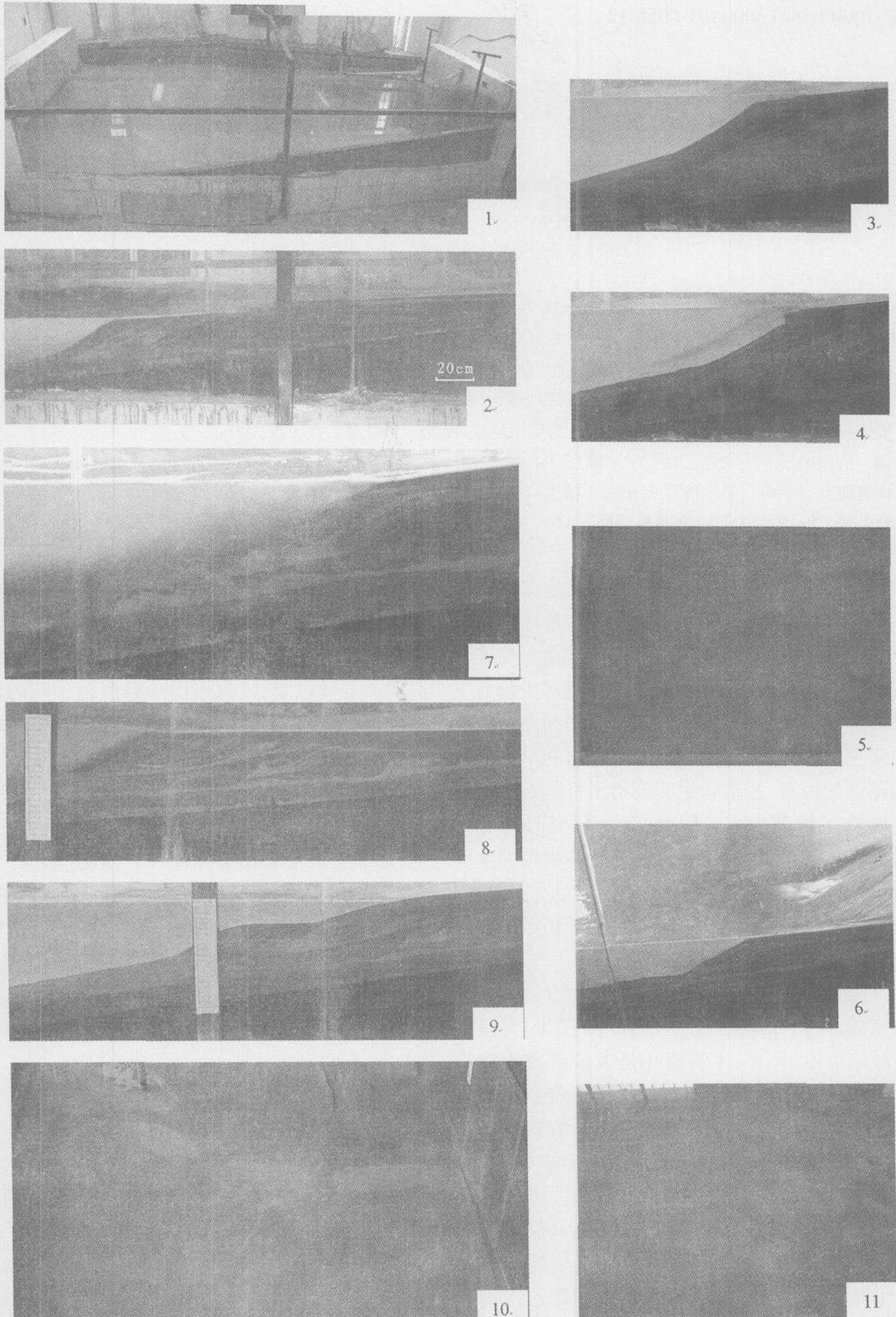
(1. College of GeoResources and Information, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257064;

2. Department of Geology in China University of Geosciences, Beijing 100083;

3. Geological Scientific Research Institute, Shengli Petroleum Administration, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015)

**Abstract** The fluxoturbidite in front of delta is an important kind of lithologic hydrocarbon reservoirs in fault basins. According to interior flume experiment simulations, the formation of fluxoturbidite in front of delta is studied under different conditions. The laboratory findings show that trigger mechanisms are the precondition to form turbidites, which include external mechanisms such as seismicity and wave action and internal mechanism such as compaction and depression of delta front sands under gravity. Seismicity can damage the stability of delta front and form liquefied fluxoturbidite and faulted fluxoturbidite. The sediments of delta front around wave base plane are eroded by wave action and took along to redeposit below wave base plane, during which turbidite is formed. Without external mechanisms, the sands in inlet of main stem can compact and descent to underneath mudstone and form fluxoturbidite. The driving force of fluxoturbidite to migrate mainly is the gravity of slumping sands. Moreover, the collision-power from hinder overlapped sand body is also the motility of faulted fluxoturbidite to move more distant besides its own gravity.

**Key words** delta front fluxoturbidite flume experiment seismicity wave action



图版 I 说明 1. 水槽模拟实验装置图; 2 水槽实验模拟的三角洲剖面图; 3 地震作用前的三角洲前缘; 4 地震作用后的三角洲前缘; 5 地震作用形成的二级断阶滑塌浊积体; 6 无外界触发机制作用下三角洲前缘主河道入水口处压实沉陷形成的断阶; 7 后期压实沉陷对前期压实沉陷的影响; 8 无外界触发机制下三角洲前缘形成的多期压实沉陷; 9 波浪作用后的三角洲前缘剖面图; 10 波浪作用形成的三角洲前缘液化带及指状砂体; 11. 波浪作用形成的小型浊积体。