

文章编号:1000-0550(2004)04-0573-06

# 三角洲前缘滑塌浊积岩形成过程初探

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

1(石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061) 2(中国石油化工股份公司胜利油田 山东东营 257015)

**摘要** 通过室内水槽实验模拟了三角洲前缘滑塌浊积岩的形成过程,总结出四种滑塌浊积岩类型,即无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。实验结果表明,外界触发机制是形成三角洲前缘滑塌浊积岩的重要条件,底形的变化结合波浪、地震等外界触发机制的作用更容易在三角洲前缘形成滑塌浊积体。此外,被破坏和改造的三角洲前缘更易找到滑塌浊积体;相反,形态规则、保存完好的三角洲前缘反而不利于滑塌浊积岩的形成。

**关键词** 三角洲 滑塌浊积岩 水槽实验 地震作用 波浪作用

**第一作者简介** 鄢继华 男 1977 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

三角洲前缘滑塌浊积岩是水下沉积物重力流的一种类型。早第三纪东营凹陷发育了大量的此类浊积体,尤其是沙三中“高水位鼎盛期”,这些小的滑塌浊积岩体呈马蹄形分散或成带分布在东营三角洲砂体前方<sup>[1]</sup>,叠合连片,形成了储量可观的岩性油藏。虽然高分辨率地层格架和层序地层的研究为这类浊积体的勘探提供了依据<sup>[2~3]</sup>,但是人们对它的形成过程和机理研究还处在探索之中,严重的制约了我们对三角洲前缘滑塌浊积体这一有利岩性隐蔽油气藏的勘探和预测。

实验模拟是研究滑塌浊积体形成过程的有效方式之一。对重力流的物理实验模拟,国内外学者做了较多的研究工作,但是多偏重于浊流的形成过程和特征的研究<sup>[4~7]</sup>。G. Shanmugam<sup>[8]</sup>通过水槽实验证实了砂质碎屑流的成因概念,认为粘土含量低(0.5%)的砂质碎屑流在缓坡上(小于 1°)可以迁移很长的距离,这对我们进一步研究重力流的成因有重要的指导意义。

对于三角洲前缘滑塌浊积岩的成因研究,赵密福等<sup>[9]</sup>认为洼陷带的开阔程度和沉积古地形、水动力条件和三角洲的规模、高建设性、三角洲前缘位置的变化和盆地的演化是控制滑塌浊积岩形成和发育的主

要控制因素。邱桂强<sup>[2]</sup>、陈嘉树<sup>[1]</sup>等则偏重于强调地形的重要性。本文在前人研究工作的基础上,通过实验模拟对三角洲前缘滑塌浊积岩的形成过程和成因机制进行了初步的探讨。

## 2 实验设计

实验在长 120 cm,宽 25 cm,高 30 cm 的玻璃水槽内进行,所用砂岩为黄河下游河道砂,以粉砂岩为主。实验共分两组进行,分别模拟砂岩夹薄层泥岩和砂泥岩等厚互层两种情况。考虑到地震、底形、波浪等各种可能的影响因素,每一组在 4 个水槽内同时进行实验,对实验过程和结果进行观察和对比,总结可能产生滑塌浊积岩的因素。

各组实验模拟的沉积环境相同,槽内底部为 4~6 cm 厚的粘土,模拟原始地形。在水槽一侧加砂和粘土,利用砂岩层和粘土层的互层模拟三角洲前缘斜坡沉积或三角洲前缘的一个朵叶体(图 1,图版 -1)。槽内水体始终高于沉积物最厚处,保证砂体全部处于水下。

## 3 三角洲前缘滑塌浊积岩成因类型

三角洲形成过程中,沉积物在水动力的搬运作用下运移至三角洲前缘,在前缘斜坡坡折处注入水介质的动力与湖盆内水体的阻力达到平衡并相互抵消,此

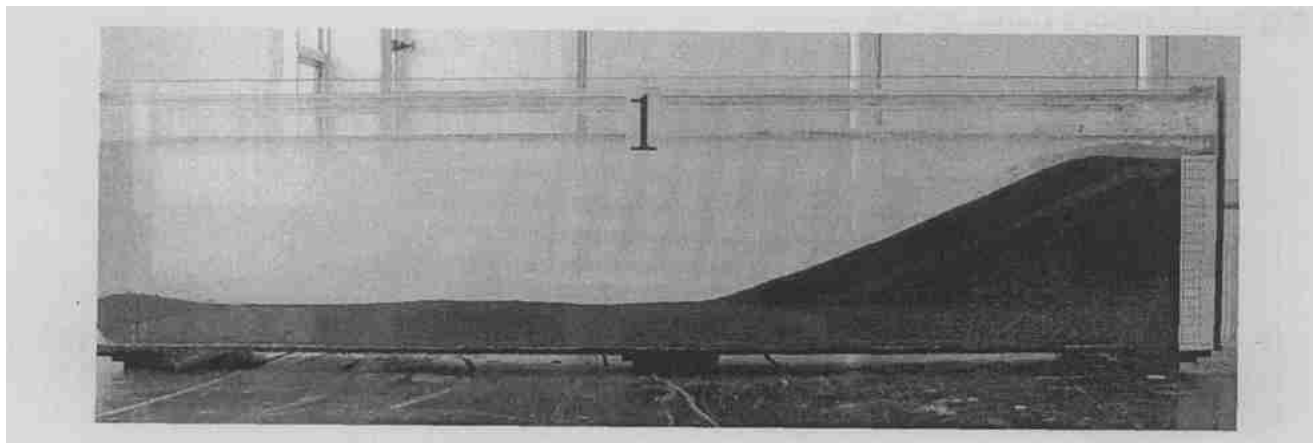


图 1 水槽实验模拟的三角洲前缘斜坡

Fig. 1 Simulated delta front slope in the flume experiment

时碎屑物质是在重力的作用下沿着前缘斜坡向坡脚处运移。我们的实验模拟的就是从前缘斜坡至湖盆中心的沉积情况。水中的砂岩除原地沉积外,主要是在重力的作用下以悬载运移和滚动运移的方式沿着斜坡向前搬运和沉积(图版 -2)。

通过实验模拟,发现并总结出四种成因类型的滑塌浊积岩:正常沉积形成的滑塌浊积岩、地震作用诱发形成的滑塌浊积岩、波浪作用形成的滑塌浊积岩和与底形相关的砂岩透镜体。

### 3.1 正常沉积形成的滑塌浊积岩

砂泥互层沉积过程中,在没有任何外界触发条件的情况下,由于砂岩层整体重力滑塌导致下部塑性泥岩变形、刺穿上部砂岩层,形成小规模滑塌砂体(图版 -3)。

三角洲前缘斜坡沉积主要表现为斜坡表面沉积物的滚动和悬载沉积。在砂泥互层的情况下,当最上层砂岩的厚度或加砂速度达到某一临界状态时,斜坡上部的砂岩层受到触动,在重力的作用下整体沿着斜

坡下滑。砂岩层的整体滑动导致下部的泥岩层发生变形,局部泥岩(斜坡中间部位)被运动的砂岩带起并一起向下运移。被带起的泥岩刺入上层砂岩中,与下部的泥岩夹层构成一个反“y”字型,随着重力滑塌的继续和泥岩的变形,反“y”字型之间的砂岩逐渐被包围或半包围在泥岩之中,形成砂岩透镜体,即三角洲前缘滑塌浊积体(图 2)。

这种正常沉积形成的滑塌浊积体砂体规模小、沉积厚度薄,主要分布在三角洲前缘斜坡的中间部位。由于砂、泥的频繁互层,在剖面上很难识别,而且后期外界触发机制的影响使得其很难保存下来。

### 3.2 地震作用诱发形成的滑塌浊积岩

东营三角洲前缘滑塌浊积岩主要发育在沙三中后期,这个时期也是东营北带断层最活跃的时期,构造活动引发的强震完全可以触及到凹陷内部各个地区,因此震动可能是产生滑塌浊积岩的最主要的触发机制,也是我们实验考虑的重点因素之一。

实验发现,震动所产生的前缘斜坡内部的正断

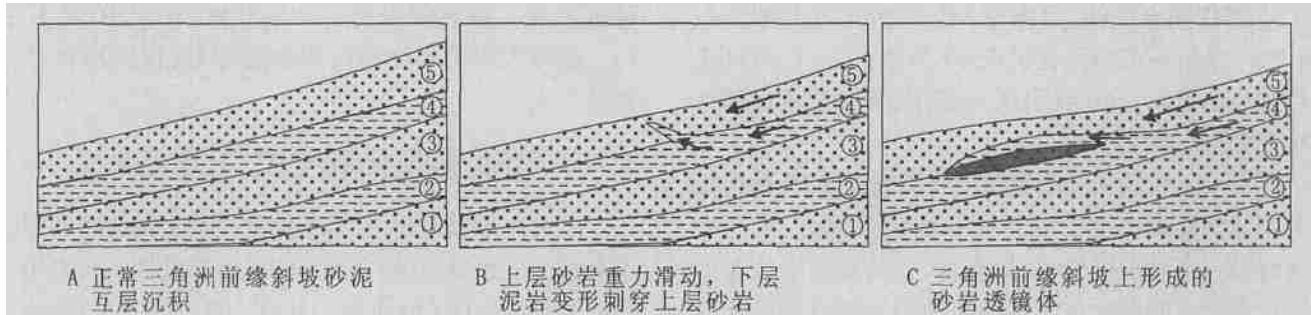


图 2 正常沉积形成滑塌浊积岩过程示意图

Fig. 2 Sketch map showing the formation of fluxoturbidite in natural sedimentation

层、泥火山以及各种复杂的变形构造均可在三角洲前缘形成孤立的滑塌浊积体或砂岩透镜体。

随着震动过程的持续,三角洲前缘斜坡经历了从初始阶段—断阶发育阶段—泥岩层强烈变形阶段—泥火山喷发阶段四个变化过程(图 3)。震动初期,前缘斜坡上产生一系列正断层将前缘斜坡断成几部分(图版 -4),每一部分可作为一个滑动体,在重力作用下向湖盆方向滑动。随着震动的继续泥岩夹层不断发生变形,由于泥岩与砂岩塑性变形的差异性使得泥岩底部形成超压孔隙或裂缝,当压力达到一定的极限时,孔隙内的固、液、气混合体上涌形成水底喷发的泥火山(图版 -5)。泥火山喷发之后,三角洲前缘已经被完全破坏掉,斜坡被夷平,沉积物发生严重变形,此后三角洲前缘处于稳定状态,不再受震动的影响。

对于一期三角洲,其前缘是不规则的,可以由多个朵叶体组成。由于三角洲前缘斜坡的不稳定性,地震作用引起的震动可以将三角洲前缘不稳定的朵叶体断开,原始沉积体部分被改造。被断开的前缘沉积物在重力的作用下整体滑动,在三角洲前缘形成滑塌浊积体(图 4)。因此,在三角洲前积层理不发育的地区前缘更易寻找这类浊积体。

此外,由于地震作用下变形构造和液化构造的复杂性,对于砂泥互层或泥岩夹层的前缘沉积,在地震过程中和地震作用之后都可以形成小规模砂岩透镜体。

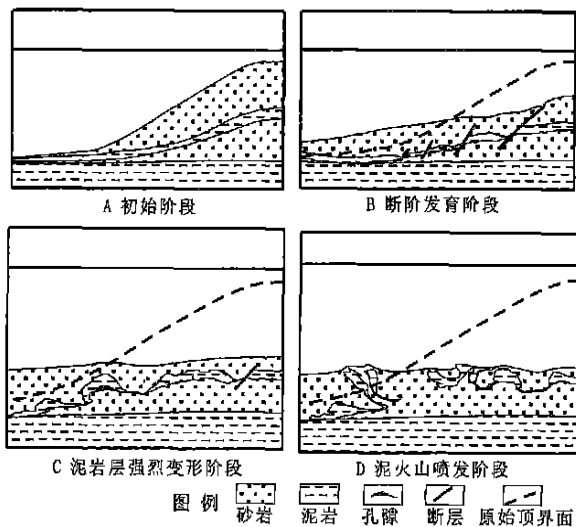


图 3 三角洲前缘斜坡随地震作用变化过程示意图

Fig. 3 Sketch map showing the change of delta front slope with seismic process

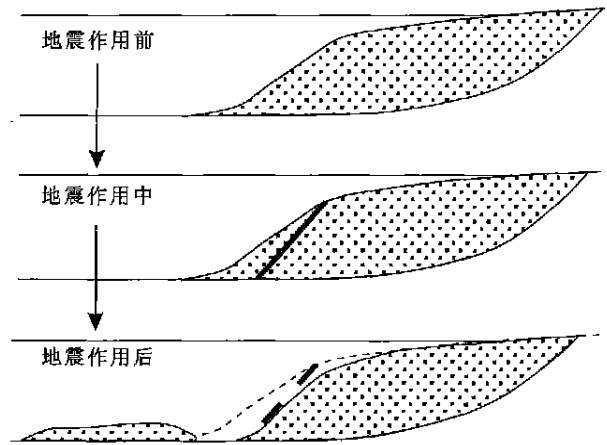


图 4 地震作用下三角洲前缘滑塌浊积岩形成过程示意图

Fig. 4 Sketch map showing the formation of fluxoturbidite with seismic process

地震作用产生的断层形成于三角洲前缘斜坡砂泥质沉积物内部,由于沉积物为软沉积,成岩固结后地震作用形成的断层无法保存下来,但仍可见到液化砂岩脉、振动液化卷曲变形等震积岩的标志<sup>[10]</sup>。

### 3.3 波浪作用形成的滑塌浊积岩

波浪对浪基面附近的三角洲前缘和前缘斜坡沉积有很强的改造作用。在波浪的作用下,浪基面附近的沉积物被改造和再沉积在浪基面之下,之后在重力的作用下沿着前缘斜坡继续向前运移,并在三角洲体的前缘再沉积形成滑塌浊积岩(图 5)。

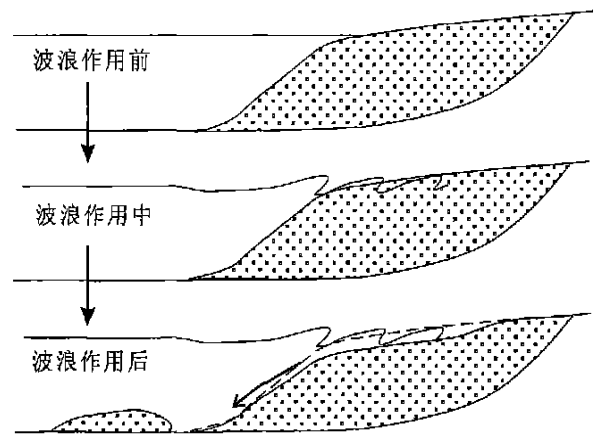


图 5 波浪作用下形成三角洲前缘滑塌浊积体过程示意图

Fig. 5 Sketch map showing the formation of fluxoturbidite with wave action

波浪对沉积物的改造是按照自上而下的顺序逐层进行的。如果最上层为砂岩,则最上层的砂岩首先受到波浪的改造,沿着前缘斜坡下滑至斜坡的坡脚

处。当该层砂岩被完全改造之后,下部的泥岩层开始受到破坏,其被改造的方式与上部砂岩层类似,也是沿着前缘斜坡运移、沉积。当波浪作用停止时,在沉积体的表面就会沉积一层较厚的泥岩。前缘斜坡坡脚处再沉积的砂岩体会被下部泥岩层、前缘被波浪改造而在其上再沉积的泥岩层以及水体安静下来后上部沉积的泥岩层所包围,在斜坡前缘形成一个砂岩透镜体(图版 6)。对于前缘多套砂泥互层沉积,波浪的分期作用可将其至上而下逐层改造,然后依次在斜坡前缘接受再沉积,从而形成一系列砂岩透镜体。

波浪的作用只能改造浪基面附近的三角洲前缘沉积,而不会影响到浪基面之下的前积层,因此在前期层理较发育的三角洲前缘寻找这类浊积体。

### 3.4 与底形相关的砂岩透镜体

与底形相关的砂岩透镜体是三角洲前缘滑塌浊积岩的一种重要形式,它主要显示为三角洲前缘负地形内的小型砂岩透镜体沉积。对于构造复杂的盆地,不同倾向的小断层可以在盆地内部形成小型的凹槽或洼地,在三角洲前缘,这种地形起伏对沉积物的运移具有一定的阻挡作用,并可作为浊积砂体的存留空间。

如果底形存在一个凹坑,沿斜坡运移过来的砂质沉积物会先将其充填,然后继续向前运移(图 6);如果三角洲前缘底形存在一系列小断阶的话,那么不论断面向哪个方向倾斜,断阶的下降盘处都是砂质沉积物聚集的有利场所(图 6、),在之后外界条件的触发之下,上部的三角洲前缘沉积不断发生变形,逐渐将负地形内的砂岩完全孤立于最初的砂层沉积,从而在三角洲前缘形成孤立的滑塌浊积体(图版 7,8)。

实际上,这种负向地形并不可以直接形成滑塌浊积体,它只是为砂质沉积物提供了一个保护场所,在后期地震等外力作用下该处砂体更容易在原地保存下来而免遭差异压实或各种构造变形的破坏。也就是说,底形与沉积后外界触发机制相结合,更容易在三角洲前缘基底面上形成滑塌浊积体或砂岩透镜体。

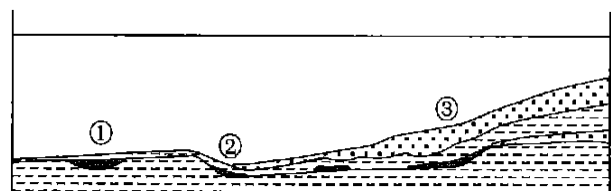


图 6 与底形相关的滑塌浊积体

Fig. 6 The fluxoturbidite associated with landform

沙三中东营凹陷内部同生断层发育,存在湖底地形的变化梯度带<sup>[2]</sup>,有利于形成这种与底形相关的滑塌浊积岩。

## 4 结论

通过水槽实验模拟三角洲前缘滑塌浊积岩的形成过程,主要得到如下结论:

(1) 三角洲前缘滑塌浊积岩的水槽实验模拟是可行的,通过实验可以总结出四种滑塌浊积岩类型:无触发机制的天然滑塌、与波浪作用相关的滑塌、与地震作用相关的滑塌、与底形相关的砂岩透镜体;

(2) 外界触发机制作用可以促使三角洲前缘滑塌浊积岩的形成,地震和波浪作用是最主要的触发机制;

(3) 底形的变化与外界触发机制相配合,更有利于在三角洲前缘的基底表面形成滑塌浊积体或砂岩透镜体;

(4) 在被破坏和改造的三角洲前缘更容易寻找滑塌浊积体沉积;相反,形态规则、保存完好的三角洲前缘反而不利于滑塌浊积岩的发育。

### 参考文献(References)

- 1 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]
- 2 邱桂强,王居峰,李从先. 东营凹陷沙三中东营三角洲地层格架与油气勘探. 同济大学学报, 2001, 29(10): 1195 ~ 1199 [Qiu Guiqiang, Wang Jufeng, Li Congxian. Preliminary study on stratigraphy architecture of middle-Shan Dongying delta and its significance to hydrocarbon exploration. Journal of Tongji University, 2001, 29(10): 1195 ~ 1199]
- 3 邱桂强,王居峰,张昕,等. 东营三角洲沙河街组三段中亚段地层格架初步研究及油气勘探意义. 沉积学报, 2001, 19(4): 569 ~ 574 [Qiu Guiqiang, Wang Jufeng, Zhang Xin, et al. Preliminary study on stratigraphic architecture of middle-Shan Dongying delta and its significance to hydrocarbon exploration. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(4): 569 ~ 574]
- 4 张春生,刘忠保,施冬,等. 涌流型浊流形成及发展的实验模拟. 沉积学报, 2002, 20(1): 25 ~ 29 [Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. The simulation experiment of surge-type turbidity current formation and development. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 25 ~ 29]
- 5 Patrice E, Carbonneau, Norm and Bergeron E. The effect of bedload transport on mean and turbulent flow properties. Geomorphology, 2000, 35: 267 ~ 278
- 6 Yu 'suke Kubo, Takeshi Nakajima. Laboratory experiments and numerical simulation of sediment-wave formation by turbidity currents. Marine Geol-

- gy, 2002, 192: 105 ~ 121
- 7 Paul Mcleod, Steven Carey, . Stephen R, Sparks J. Behavior of particle-laden flows into the ocean: experimental simulation and geological implication. *Sedimentology*, 1999, 46: 523 ~ 536
- 8 Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models—a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17:285 ~ 342
- 9 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 Mifu, Xin Quanlin, Liu Zerong. Distribution rules of fluxoturbidite in the Linnan sag of the Huimin depression and their control factors. *Petroleum Geology & Experiment*, 2001, 23(3):267 ~ 271 ]
- 10 陈世悦,袁文芳,鄢继华.济阳坳陷早第三纪震积岩的发现及其意义.地质科学,2003,38(3):377 ~ 384 [ Chen Shiyue, Yuan Wenfang, Yan Jihua. Discovery and significance of earthquake event deposits of early Tertiary in the Jiyang depression. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(3):377 ~ 384 ]

## Preliminary Study on the Formation of Fluxoturbidite in Front of Delta

YAN Ji-hua<sup>1</sup> CHEN Shi-yue<sup>1</sup> SONG Guo-qi<sup>2</sup> JIANG Zai-xing<sup>1</sup> QIU Gui-qiang<sup>2</sup>

1 ( Faculty of Geo-Resources and Information, University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061)

2 ( Geological Scientific Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong 257015)

**Abstract** According to the in-door flume experiment simulations, the formation of fluxoturbidite in front of delta is studied. It is summarized that there are four kinds of fluxoturbidite in front of delta. They are the fluxoturbidite with no trigger action and one associated with seismic process, one with wave action and sandstone lens correlative with landform. The experiments suggest that trigger actions are the most important conditions to form fluxoturbidite in front of delta. Together with wave action and seismic process, the change of landform can promote forming fluxoturbidite. Also, the fluxoturbidite can be found easily in front of the delta where the delta front has been destroyed and rebuilt. In contrast, the regular and good reserved delta front is disadvantaged to form fluxoturbidite.

**Key words** delta, fluxoturbidite, flume experiment, seismic process, wave action

**图版 说明** 1.水槽实验模拟的三角洲前缘斜坡或朵叶体;2.实验模拟过程中前缘斜坡沉积物的运移方式。以悬载运移和滚动运移为主;3.无触发机制条件下在前缘斜坡中央位置形成的小型砂岩透镜体;4.地震作用过程中前缘斜坡形成的小型正断层;5.地震作用后期的泥火山喷发以及前缘斜坡的强烈变形;6.波浪作用下在三角洲前缘形成的滑塌浊积体;7.地震作用后在基底负向地形上形成的砂岩透镜体;8.地震作用后在断阶下降盘处形成的砂岩透镜体

鄢继华

图版I

