

# 湖盆三角洲沉积坡度带特征及其与滑塌浊积岩分布关系的初步探讨

操应长, 刘晖

中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东东营, 257061

**内容提要:**三角洲前缘滑塌浊积岩是分布于深水环境中一种重要的储集砂体,也是陆相湖盆中一种重要的岩性油气藏。三角洲沉积体系一般存在三个地形坡度转折点,即顶积层与前积层之间的转折点、三角洲前缘斜坡与前三角洲沉积的转折点、三角洲沉积体系与正常湖泊沉积作用的转折点,其中前缘斜坡的地形坡度最大。前缘斜坡地形坡度是控制滑塌作用和形成滑塌浊积岩的关键因素之一,滑塌作用一般发生于前缘斜坡的上部,而滑塌浊积岩主要分布于前缘斜坡的根部和前三角洲外侧,这些地区是三角洲沉积体系中地形坡度的转折点。前缘斜坡的坡度决定了前三角洲外侧坡度转折点的位置,坡度越大,转折点越靠近前缘斜坡带,结合东营三角洲的精细解剖分析,建立两者之间的定量关系式。

**关键词:**三角洲;滑塌浊积岩;岩性油气藏;地形坡度;定量预测

三角洲前缘滑塌浊积岩是陆相湖盆中水下沉积物重力流的一种类型,一般分布于深水暗色泥岩之中,具有良好的成藏条件,已成为深水沉积区有利的油气勘探目标(潘元林等,1998)。东营三角洲位于东营凹陷东部,是沙三段沉积时期重要的沉积体系,且在其前缘发育了大量的滑塌浊积岩,平面上呈马蹄形分散或成带分布在东营三角洲砂体的前方,纵向上叠合连片(张勇等,2001;邱桂强等,2001)。近年来的油气勘探表明,与东营三角洲共生的滑塌浊积岩蕴藏着丰富的油气资源,已成为东营凹陷油气勘探的重要领域(冯友良等,2001;王金铎等,2003)。如何正确预测三角洲前缘地区滑塌浊积岩的分布位置,是寻找更多的与三角洲滑塌浊积岩相关的岩性油气藏的重要保障。本文结合东营三角洲的空间分布结构特征解剖和室内水槽实验的观察、分析,系统总结了三角洲沉积体系的古地形结构特征及其影响因素,探讨了三角洲沉积体的古地形特征与滑塌浊积岩分布的关系,并对分布位置的定量预测进行了初步探讨。

## 1 东营三角洲的沉积坡度带特征

东营三角洲分布于东营第三系盆地的东部(图

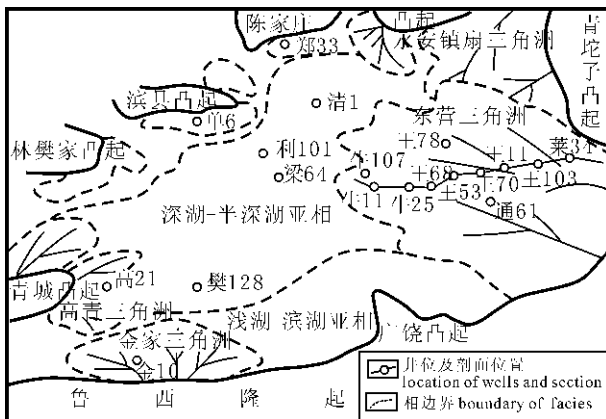


图1 东营凹陷沙三中亚段沉积体系分布图  
(据邱桂强等,2001)

Fig. 1 Depositional system map of the Middle Submember, 3rd Member, Shahejie Formation in the Dongying sag (after Qiu Guiqiang et al., 2001)

1),开始形成于沙三段早期、结束于沙二末期,其在钻井、测井资料和地震反射特征上具有清晰的三层结构,成为研究三角洲沉积体内部结构特征的基础(邱桂强等,2001)。沙三中沉积时期,是东营三角洲的主体发育时期,依据地震反射结构、钻井和测井资

注:本文为(教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET)和国家“十五”科技攻关项目(编号 2003BA613A-02)的成果。

收稿日期:2007-01-22;改回日期:2007-05-26;责任编辑:章雨旭。

作者简介:操应长,男,1969年1月生。1992年7月毕业于石油大学。现为中国石油大学教授,主要从事沉积学、层序地层学等教学和研究工作。电话:0546-8391680;Email:caoych@hpu.edu.cn。

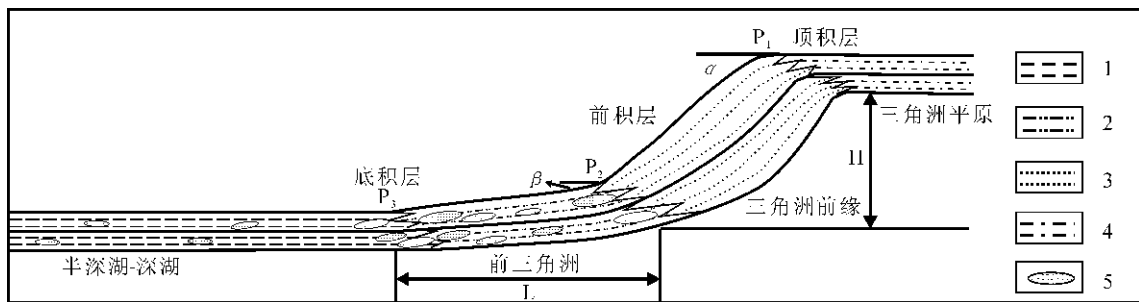


图2 东营三角洲地形坡度变化特征模式图

Fig. 2 The character of topography slope mode chart, Dongying delta

1—深水泥岩; 2—前三三角洲泥岩、粉砂质泥岩; 3—三角洲前缘砂岩; 4—三角洲平原泥岩; 5—滑塌浊积岩

1—deep water mudstone; 2—prodelta mudstone; 3—delta front sandstone; 4—delta plain mudstone; 5—fluxoturbidite

料所代表的反韵律地层变化、厚层泥质岩的存在及三维地震上反射的强弱和连续性、地震反射波组特征等,沙三中东营三角洲可划分出6个期次(邱桂强等,2001)(图版I-1),从上至下分别称之为中1( $E_s^{3z-1}$ )、中2( $E_s^{3z-2}$ )、中3( $E_s^{3z-3}$ )、中4( $E_s^{3z-4}$ )、中5( $E_s^{3z-5}$ )、中6( $E_s^{3z-6}$ )。

由于三角洲沉积体系中不同环境的水动力条件、沉积作用等存在差异,三角洲沉积体在空间上一般发育了清楚的三层结构:顶积层、前积层和底积层(图2)。顶积层主要对应于三角洲沉积体系的水上沉积部分,地形平缓,接近于水平状态,沉积物为沼泽泥岩夹分流河道砂岩;前积层对应于三角洲前缘斜坡带,地形坡度大,以砂质沉积物为主;底积层主要对应于前三三角洲和正常深湖相沉积,地形也相对平缓,主要为暗色泥岩。在埋藏压实过程中,不同岩性的沉积地层产生的压实响应不同,但同一岩性在相同的埋藏压实环境下产生的压实效应相同。对于三角洲三层结构中同一结构层,可认为其岩性基本一致,其对埋藏压实产生的效应基本一致,因此,埋藏压实作用对同一结构层的地层产状的影响较小。为了恢复三角洲沉积体中不同结构层沉积时的地形坡度,我们选择沿着水流方向、三层结构清楚的三维地震剖面,采取“层拉平”的方法,消除后期构造运动对原始地层产状的影响,保证顶积层处于水平或近似水平的位置,此时前积层、底积层的坡度基本可以代表了当时沉积时三角洲沉积体的地形坡度特征(图版I-2)。

## 2 三角洲沉积体中前积层坡度的控制因素

图版I-3为室内水槽环境中,在单一水流和物

源供给条件下三角洲形成过程的剖面图。该剖面图中三角洲沉积体的三层结构也比较清楚,且顶积层基本近于水平,前积层的坡度最大,底积层相对平缓。该剖面所显示的水槽实验经历了五个阶段:第一个阶段为闭流状态,水平面处于上升阶段的实验过程;第二阶段为敞流状态,水平面处于稳定阶段的实验过程;第三阶段为闭流状态,水平面处于上升阶段的实验过程;第四阶段为改变沉积物供给方向,继续保持闭流状态的实验过程,水平面持续上升,但剖面处沉积速率滞后水平面的上升速率;第五阶段为改回沉积物的初始供给方向,继续保持闭流状态的实验过程,水平面持续上升。通过对该实验沉积剖面上沉积纹层的产状、沉积水深等参数的测量,结合东营三角洲的三层结构特征分析,探讨了三角洲沉积体中前积层坡度的控制因素。

(1) 沉积水深,图3是水槽模拟实验中不同沉积水深与前积层坡度角的关系图。由该关系图可以看出,随着沉积水深增加,沉积体前缘斜坡角也增

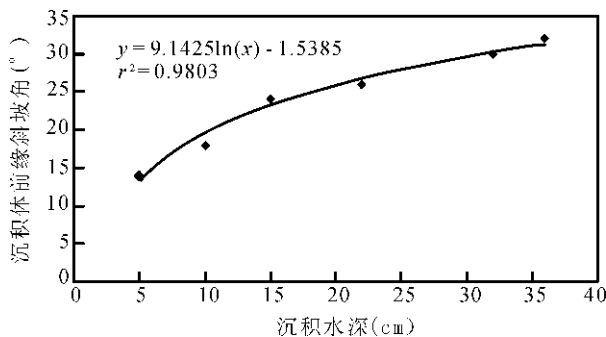


图3 沉积水深与沉积体前缘斜坡角关系

Fig. 3 The relationship of depositional water depth (X-axis, cm) and angle of foreslope (Y-axis, °)

大,且水深相对较浅时,增大幅度明显;水深较深时,增大幅度较小,同时该回归线趋于平缓,说明当水深增加一定深度时,沉积坡度将保持一定的角度,该角度就是此类沉积物的最大堆积角度或稳定坡度角。图版 I-3 所示的水槽实验沉积剖面的第三阶段为绝对水平面持续上升状态下形成的,由其可以看出,前积层的倾角从下向上存在逐渐增大的趋势。

(2) 沉积物的粒度,通过水槽实验观察,沉积体前缘斜坡的坡度与沉积物的组成也密切相关,而与底形的坡度无关。在实验过程中,我们通过改变沉积物粒度,不同粒度的沉积物所形成的沉积体前缘斜坡的坡度角不同,并且沉积物越粗坡度角越大,而粒度越细时坡度角越小。当沉积物含较多砂砾岩时,沉积体前缘斜坡的最大坡度角为  $40^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ;沉积物以中粗砂为主的混合砂时,沉积体前缘斜坡的最大坡度角为  $30^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ;沉积物以细粉砂为主,沉积体前缘斜坡的最大坡度角为  $27^{\circ} \pm 5^{\circ}$ ;当前积体为砂泥互层时,最大坡度角为  $20^{\circ} \pm 5^{\circ}$ 。

(3) 沉积过程中水平面的变化特征,当沉积基底保持稳定时,沉积过程中水平面的升降变化控制了可容空间的变化,也控制了沉积体叠加特征和推进速度。由图版 I-3 可以看出,实验中第二阶段为敞流湖盆状态,水平面保持相对稳定,此时沉积体的顶积层相对不发育,沉积岸线向盆地中心推进速度较快,且可容空间减小,水深也变浅;实验中第三阶段为闭流湖盆状态,水平面保持持续上升,沉积体的顶积层发育,沉积岸线向盆地中心推进速度较慢,且可容空间增大,岸线外侧的水深逐渐增加。因此导致了在这两种背景条件下,沉积体斜坡的坡度角存在差异(图版 I-3),水平面保持相对稳定的第二阶段,坡度角可能逐渐减小;而水平面处于上升状态的第三阶段,坡度角逐渐增大。东营盆地东营三角洲

沙三中 3 号和 4 号沉积前积体的空间结构存在差异(图版 I-4),中 3 号沉积前积体的地震反射具有顶削结构,空间上表现为斜交前积的反射结构特征,反映顶积层不发育;而中 4 号沉积前积体的地震反射表现为“S”型斜交前积的反射结构特征,反映顶积层发育。中 3 和中 4 的两种结构特征实际上反映了沉积过程中水平面的变化特征,前者形成于水平面相对稳定,甚至下降状态下;后者形成于水平面持续上升状态。通过“层拉平”后的地震剖面的相关数据测定、处理和计算,中 3 前积体的斜坡角一般为  $1.5^{\circ} \sim 6^{\circ}$ ,而中 4 号一般为  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ 。

### 3 三角洲沉积体前缘斜坡的坡度与滑塌浊积岩分布

三角洲滑塌浊积岩是由于三角洲前缘斜坡沉积体存在一定的坡度,在外界某种触发机制如地震、风暴浪、差异压实等作用,导致早期沉积物发生再搬运、沉积的产物。滑动作用的发生除了与外界触发机制之外,还与沉积古地形也密切相关(鄢继华等, 2004),特别是三角洲沉积体的前缘斜坡或前积层的坡度。一般情况下,三角洲沉积体前缘斜坡的坡度角越大,沉积物的稳定性越差,外界条件稍一触发,就会导致沉积物的滑动;当坡度角达到临界稳定角时,甚至出现无外界触发机制的滑动(鄢继华等, 2004)。

滑塌浊积岩属于典型的沉积物重力流,足够的坡度角是形成沉积物重力流的基本条件之一(姜在兴, 2003),同时,地形坡度突然变缓是沉积物重力流发生大规模卸载的先决条件。由东营三角洲沉积体系的地形坡度变化特征(图 2),可以看出三角洲斜坡带之下存在两个地形坡度突然变缓的转折点:  $P_2$  和  $P_3$  点。该两个转折点的外侧地形坡度明显变缓

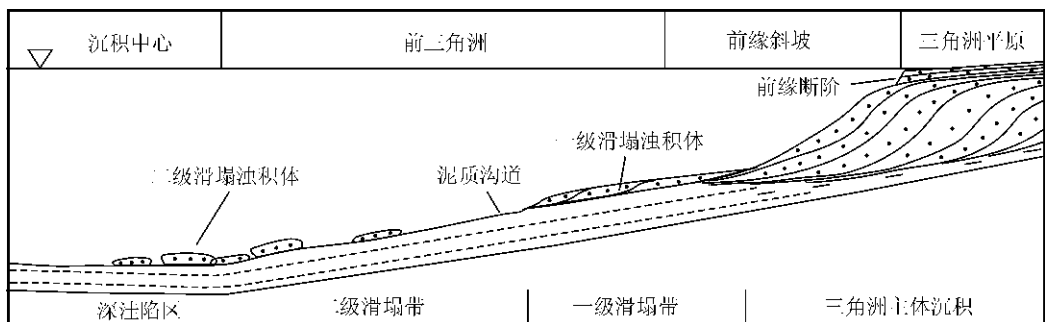


图 4 水槽模拟实验下滑塌沉积体分布与地形坡度的关系(据张关龙等, 2006)

Fig. 4 The relationship of the distribute of fluxoturbidite and topography slope

(after Zhang Guanlong et al., 2006)

(图 2),势必将导致斜坡带形成的滑动体在此发生卸载。张关龙(2006)等通过三角洲前缘滑塌浊积岩的水槽模拟实验也得出了相同的认识,图 4 为根据水槽模拟实验所总结出的三角洲前缘滑塌浊积岩分布剖面示意图。三角洲前缘滑塌浊积岩在空间上分布存在两个集中带(图 4):第一集中带位于三角洲前缘斜坡的坡脚处,即相当于图 2 中  $P_2$  点;第二集中带位于三角洲沉积与正常湖泊沉积之间,相当于图 2 中  $P_3$  点。由于两个转折点距离斜坡带的距离和外侧的地形坡度不同,决定了两个集中带发育的滑塌沉积体也不同。第一集中带的滑塌沉积体规模大,厚度也大;第二集中带的滑塌沉积体规模小,零星分布。虽然在两个集中带的外侧也有滑塌沉积体的分布,但数量、规模均远不及集中带。因此,搞清三角洲沉积体及其前缘地区的地形坡度变化点即  $P_2$  和  $P_3$  点的位置,就可预测滑塌沉积体的主体分布区。对于第一集中带即  $P_2$  点一般位于三角洲沉积的前缘斜坡脚附近,且滑塌沉积体邻近三角洲沉积体分布,甚至叠置在一起,较易进行预测。第二集中带的滑塌沉积体是分布于深水环境中的岩性透镜体,因此,确定第二集中带即  $P_3$  点的位置是预测三角洲前缘滑塌沉积体的主体发育区的有力方法。

选择沿着水流方向上三层结构比较清楚的地震剖面,采取层拉平的方法,然后精细解剖沉积前积层的坡度角  $\alpha$  与  $L$  ( $P_2$  点和  $P_3$  点之间的距离,即前缘斜坡脚距  $P_3$  点的长度,也相当于前三角洲斜坡延伸距离)(图 2)的关系,总体上,坡度角  $\alpha$  越大,  $L$  越短。这样,选择系列符合上述条件的地震剖面,读取相关三个转换点的坐标数据,通过时深转换后计算出斜坡带的坡度、长度。图 5 为东营三角洲中 4、中 5、中 6 等前积体前缘斜坡的坡度角( $\alpha$ )与  $L$  之间的关系图,并通过回归分析建立两者之间的相关关系式:

$$y = -2287.1 \ln x + 7273.6 \quad (1)$$

其中,  $y$ —前缘斜坡脚距  $P_3$  点的长度  $L$ ,单位:m;  $x$ —三角洲前缘斜坡的坡度角  $\alpha$ ,单位:°; 两者的相关系数:  $R^2 = 0.8435$ 。

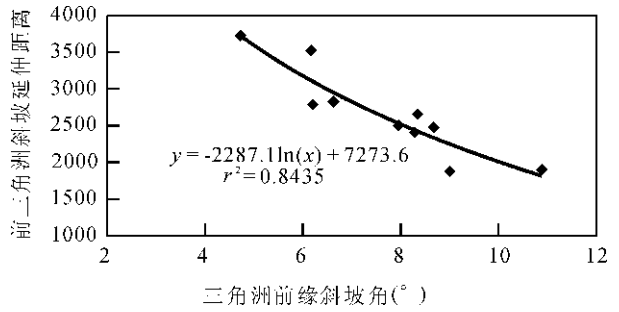


图 5 东营三角洲前缘斜坡角(横坐标,单位:°)与前三角洲斜坡延伸距离(纵坐标,单位:m)的关系图

Fig. 5 The relationship of foreslope angle of Dongying delta(X-axis, unit:°) and extant distance of prodelta slope(Y-axis, unit: m)

表 1 为通过回归关系式(1)计算出不同坡度角下的  $L$  值,由其可以看出,当三角洲前缘斜坡角度达到 20°以上, $L$  值很小,这意味着此时形成的滑塌浊积岩主要分布于斜坡角附近。实际上,当沉积体或沉积地形坡度达到 20°以上时,一般与断层有关,“断坡控砂”就是说明了砂体一般靠近断层分布于下降盘之上(冯友良,2001)。同时,结合中 6 三角洲沉积体与滑塌浊积岩分布分析,该时期三角洲前缘斜

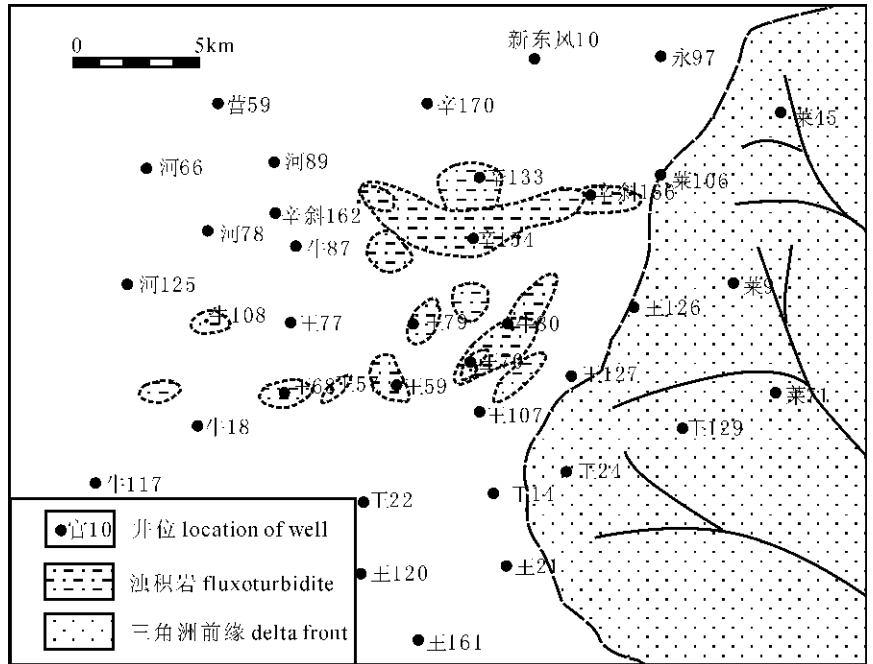


图 6 东营三角洲中 6 亚期滑塌浊积岩分布图(据胜利油田内部资料,2005)  
Fig. 6 The distribution of fluxoturbidite, Middle-6 subperiod, 3rd Member, Shahejie Formation, Dongying Delta (after unpublished data of Shengli Oil Field, 2005)

坡角一般为 $3^{\circ}\sim 8^{\circ}$ ,由此推算前三角洲斜坡延伸距离为4760~2517m,这意味着在前积体的前方5000~2500m附近将是滑塌浊积岩有利分布区,这与该时期的浊积岩的分布情况基本吻合(图6)。图6为胜利油田根据勘探实践和地质研究所建立的三角洲沉积体与该前积体前缘的滑塌浊积岩分布图,该时期的滑塌浊积岩主要分布在距离前缘边界线的2000~6000m范围内。

## 4 结论

通过对东营三角洲三层结构的精细解剖和三角洲沉积水槽模拟实验剖面的观察分析,可以得到以下认识:

- (1)三角洲沉积的前缘斜坡倾角主要受沉积水深、沉积物粒度和沉积过程中水平面变化控制,一般粒度越粗、水体越深,斜坡的倾角越大;
- (2)三角洲沉积体存在三个地形坡度转折点,即顶积层与前积层之间的转折点、三角洲前缘斜坡与前三角洲沉积的转折点、三角洲沉积体系与正常湖泊沉积作用的转折点,位于斜坡带之下的转折点附近是滑塌浊积岩的有利发育带;
- (3)前三角洲沉积斜坡带的长度与三角洲前缘

斜坡倾角密切相关,倾角越大,长度越短,滑塌浊积岩越靠近前缘斜坡带分布。

## 参 考 文 献 / References

- 冯有良,李思田. 2001. 东营凹陷沙河街组三段层序低位域砂体沉积特征. 地质论评, 47(3):278~286.
- 冯有良. 2006. 断陷湖盆沟谷及构造坡折对砂体的控制作用. 石油学报, 27(1):13~16.
- 姜在兴. 2003. 沉积学. 北京:石油工业出版社, 357~358.
- 潘元林,孔凡仙,杨申疆,等. 1998. 中国隐蔽油气藏. 北京:地质出版社, 317~318.
- 邱桂强,王居峰,张昕,等. 2001. 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, 19(40):569~574.
- 王秉海,钱凯. 1991. 胜利油区地质研究与勘探实践. 山东东营:石油大学出版社, 50.
- 王金铎,韩文功,于建国,等. 2003. 东营凹陷沙三段浊积岩体系及油气勘探意义. 石油学报, 24(6):24~29.
- 鄢继华,陈世悦,宋国奇,等. 2004. 三角洲前缘滑塌浊积岩形成过程初探. 沉积学报, 22(4):573~578.
- 张关龙,陈世悦,鄢继华,等. 2006. 三角洲前缘滑塌浊积体形成过程模拟. 沉积学报, 24(1):50~55.
- 张勇,柳永清. 2001. 惠民凹陷西部老第三系沙河街组三段三角洲体系及砂岩体沉积特征和演化规律. 地质论评, 47(3):322~328.

# Discussion the Relationship between the Distribution of Fluxoturbidite and the Depositional Slope of Delta and Its Characteristics in the Lacustrine Basin

CAO Yingchang, LIU Hui

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

## Abstract

The fluxoturbidite in delta front is an important reservoir sandbody distributing in deep water environment, and it's an important lithologic hydrocarbon reservoir in the lacustrine basin. The delta depositional system generally has three topography slope breakpoints, namely the breakpoint between topset and foreset, the breakpoint between delta foreslope and prodelta and the breakpoint between delta depositional system and normal lacustrine depositional system, of them the topography grade of the foreslope is the biggest. The topography grade of the foreslope is one of the key factors which control the forming of fluxoturbidite. The slumping action occurs in the top of foreslope, and fluxoturbidite mainly distributes the bottom of the foreslope and the outside of the prodelta, these zones are topography slope breakpoints in the delta depositional system. The grade of the foreslope decides the location of the slope breakpoints in the outside of prodelta, the bigger the grade, the smaller the distance between the breakpoint and the foreslope. The quantitative correlation formula between the grade and the distance is established based on the fine dissection of Dongying Delta.

**Key words** : delta; fluxoturbidite; lithologic hydrocarbon reservoir; topography slope; quantitative prediction

