

济阳坳陷东营三角洲前缘斜坡重力流成因 砂体特征及形成条件

刘鑫金^{1,2}, 刘惠民¹, 宋国奇³, 刘卫东⁴, 王小玉⁵

(1. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015; 2. 中国石化胜利油田分公司博士后科研工作站, 山东东营 257002; 3. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257001; 4. 山东省第七地质矿产勘查院, 山东临沂 276006; 5. 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院, 山东济南 250000)

摘要:运用最新的深水重力流理论开展系统研究, 细分大型三角洲前缘斜坡重力流成因砂体类型, 并建立各类型砂体的判别标准, 探讨砂体展布的控制因素。研究表明: 大型三角洲前缘斜坡发育一系列重力流成因砂体, 砂体并非由单一流体形成, 包含了塑性体、砂质碎屑流及浊流等多种流体的有序转化和多个岩相组合; 根据纵向上序列组合的差异, 可把重力流砂体类型划分为滑动成因砂体、滑塌成因砂体、碎屑流成因砂体和浊流; 利用岩心沉积构造特征、粒度特征、测井相和地震相等多角度对比可识别砂体类型; 三角洲前缘斜坡重力流成因砂体的形成与展布受控于古物源、古沉积坡角、同沉积断层和沉积基准面旋回变化等因素, 其中充足的物源是重力流砂体发育的物质基础、适宜的古坡角是重力流砂体有序展布的必要条件、同沉积断层下降盘是砂体发育的有利区, 而基准面旋回变化决定了重力流砂体的纵向分布样式。

关键词:三角洲前缘斜坡; 重力流成因砂体; 砂质碎屑流; 识别标志; 东营凹陷

中图分类号: TE 122.1 **文献标志码:** A

引用格式: 刘鑫金, 宋国奇, 刘惠民, 等. 济阳坳陷东营三角洲前缘斜坡重力流成因砂体特征及形成条件[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 36-45.

LIU Xinjin, SONG Guoqi, LIU Huimin, et al. Characteristics and formation condition of gravity flow developing in low-lying slope zone of Dongying delta in Jiyang Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(4): 36-45.

Characteristics and formation condition of gravity flow developing in low-lying slope zone of Dongying delta in Jiyang Depression

LIU Xinjin^{1,2}, LIU Huimin¹, SONG Guoqi³, LIU Weidong⁴, WANG Xiaoyu⁵

(1. Research Institute of Exploration and Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257015, China;
2. Postdoctoral Scientific Research Workstation of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257002, China;
3. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257001, China;
4. The Seventh Institute of Geology & Mineral Exploration of Shandong Province, Linyi 276006, China;
5. Shandong Zhengyuan Institute of Geological Exploration, China Central Bureau of Metallurgy and Geology, Jinan 250000, China)

Abstract: The latest deep-water gravity current theory was used to subdivide the type of the gravity flow developed in the low-lying slope zone of large delta, and the discerning standards were established; and then the controlling factors of the distribution were discussed. The results show that a series of gravity flows can be developed in the low-lying slope zone of the large delta. The sand body formation however is not determined by one certain flow state, but always by several flow states including plastomer, debris flow and turbidite. They transform in order and have different lithofacies associations. According to

收稿日期: 2017-01-21

基金项目: 中石化重大专项(ZDP17008)

作者简介: 刘鑫金(1983-), 男, 工程师, 博士, 博士后, 研究方向为石油地质和沉积学。E-mail: liuxinjin.slyt@sinopec.com。

the different longitudinal sequential patterns, the gravity flow could be divided into four types, which include the slide sand, the slump sand, the debris flow sand and turbidite. By comparative analysis of sedimentary structure characters, grain size characters, logging face and seismic face, the sand type could be identified. The controlling factors of the formation and distribution of gravity flow which developed in the low-lying slope zone of large delta include ancient material source, ancient sedimentary slope angle, contemporaneous fault and depositional base-level cycle. Ample material source is the material base for the development of gravity flow, and different types of sands could transform in order when the slope has suitable sedimentary angle. The decreasing plate of codeposition fault is the favorable development area, and the depositional base-level cycle controls the longitudinal distribution of the gravity flow sands.

Keywords: low-lying slope zone of large delta; gravity flow; debris flow; identification mark; Dongying Sag

重力流沉积理论始于广义的浊流理论,早在 20 世纪 20 年代加拿大格兰德滩大洋中的高密度流冲断海底电缆引起了学者对深水重力流的研究,60 年代初期 Bouma^[1]通过对复理石的研究(经典浊流理论)提出鲍马层序具有重要的影响力。1997 年 Shanmugam^[2-3]提出在深水区发育大规模砂质碎屑流的新认识,挑战传统浊流观点,代表了深水重力流最新的研究进展。目前,针对陆相断陷盆地湖相重力流砂体的研究已经提升到了一个新的阶段,很多学者逐步认识到中国陆相断陷湖盆深洼带较少存在浊流成因的浊积岩^[4-7],湖盆内大量发育的块状砂岩是典型砂质碎屑流沉积已基本达成共识,具体的解剖实例多集中在中国西部的鄂尔多斯盆地^[8-9],针对东部凹陷砂质碎屑流的研究少见报道。笔者首次运用最新的深水重力流理论对东营凹陷大型三角洲前缘斜坡重力流成因砂体进行系统研究,打破了以往生产上“泛浊流”论的认识,细分重力流成因砂体类型,并建立各砂体类型的判识标准,探讨砂体展布的控制因素,丰富陆相断陷湖盆重力流沉积理论,对老区隐蔽油气藏挖潜具有重要的理论指导意义。

1 研究区地质概况

研究区位于东营凹陷南坡东段的广大缓坡地区,主要发育近东西向和北东向两组断层,整体上呈现为东南高、西北低的特点。沙三中沉积时期发育大型的东营三角洲由东南向西北推进,三角洲的范围从早到晚逐渐扩大,自下而上可以划分为 Z₆、Z₅、Z₄、Z₃、Z₂ 和 Z₁ 等 6 个砂层组。东营三角洲前方发育大量重力流成因砂体。近年来,勘探工作者逐步发现一种新的重力流成因砂体,发育在三角洲前缘斜坡二级坡折带上部和下部,认为是三角洲前缘的滑移体和滑塌体,与前缘砂体类似,具有反韵律特征,与经典浊流沉积不同。诸多学者在其研究中均逐步认识到在三角洲前缘斜坡上存在多种类型的重力流成因砂体^[10-14]。

2 重力流砂体类型

以前针对东营凹陷深洼带重力流砂体的研究存在“泛浊流论”的弊端,特别是在勘探生产中,习惯性的把重力流成因砂体笼统的称为“浊积岩”。随着研究精度的加深,隐蔽油气藏勘探难度的加大,从砂体成因上将重力流成因砂体细分成为增储上产的需要。

2.1 划分依据

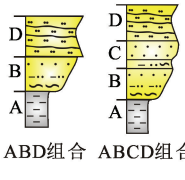
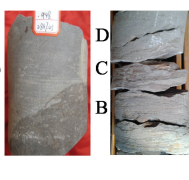
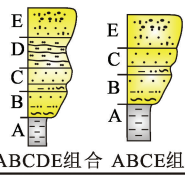
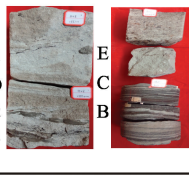
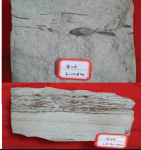
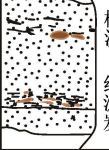
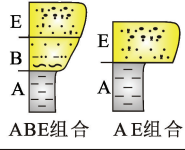
前人对重力流成因砂体的划分方案较多,如吴崇筠^[15]根据浊积砂体在湖盆中所处的位置和形态,将湖相浊积岩体系归纳为 6 种成因类型,此后学者分别运用远源与近源、薄层与厚层、粗粒与细粒、典型与非典型、坡移与滑塌等术语进行描述和分类。对三角洲前缘斜坡的重力流砂体划分依据及命名也缺少统一的标准,一类是根据基准面旋回对重力流成因砂体的控制作用来划分,认为在中期基准面上升早期,湖水或者洪水对三角洲前缘进行侵蚀冲刷,致使大量沉积物沿湖盆边缘斜坡发生坡移形成的重力流沉积为坡移扇,基准面下降期形成的重力流砂体为滑塌浊积岩^[16-18];另一类从重力流沉积物的形成过程或展布范围角度分析,认为典型浊积岩的形成经历了岩崩、滑动、滑塌、块体流、流体流和浊流的演化过程,在中间过程中可形成滑移体,且主要分布在块体滑塌区^[19-20]。从沉积物搬运机制上看,沉积物沿不连续截切面崩塌,内部少发生形变或转动为滑动沉积,伴有转动、较少发生内部形变为滑塌沉积;剪切作用分布于整个沉积物块体中,杂基支撑强度主要来自黏附力,次为浮力,非黏滞性沉积物由分散压力支撑,高浓度时流体呈惯性,低浓度时流体呈黏性,这种具有多流变状态的沉积物为砂质碎屑流。而浊积岩是由湍流支撑的黏性流体。按照 Shanmugam^[2-3]分类方案,滑动、滑塌、碎屑流为块体搬运,浊积岩为浊流,其中滑动、滑塌的沉积物体积浓度为 100%,碎屑流的沉积物体积浓度介于 25% ~

100%,而浊流的沉积物体积浓度仅为 1% ~ 25%。本文中综合考虑重力流成因砂体的搬运机制和展布规律,对三角洲前缘斜坡的砂体类型进行划分,研究认为三角洲前缘发育的砂体并非由单一流体形成,包含了砂质碎屑流及浊流等多种流体的有序转化和多个岩相组合。

2.2 砂体类型

处于三角洲前缘斜坡的朵叶体,在压实沉陷、地震、湖水动力及洪水作用等因素影响下发生断裂,在重力作用下向前滑动、滑塌、碎屑流化,最终才转化为浊流。整个块体在刚发生破裂时是刚性的,当滑移面上的剪切力大于岩石的屈服强度时,在重力作用下向前滑移,并在底部形成一个层流段,并发生塑

性变形,其中的流纹、撕裂屑,以及上部刚性筏受力后在强度薄弱的部分产生的滑动变形均可作为“化石”保存下来,成为鉴别流体性质的重要标志。在转化为浊流之前,断开的朵叶体经历了块体到塑性体的演化,其沉积物体积浓度逐渐降低,作为一个块体,其底部、核部及顶部的液化变形的程度和液化过程有所差异。本文研究过程中,把转化为浊流之前形成的砂体统称为“坡移扇”。根据坡移砂体滑移相对距离远近及在纵向上各层段发育程度的差异,又可把坡移扇砂体进一步划分为 3 类^[21],分别为滑动成因砂体、滑塌成因砂体和碎屑流成因砂体,3 种类型在垂向上具有不同的沉积模式(图 1)。

类型	岩心特征	沉积特征模式图	序列模式类型	典型岩心实例	基本特征描述
滑动成因砂体		 三角洲前缘 泥岩撕裂屑 沙泥搅浑构造	 ABD组合 ABCD组合	 D C B	滑移距离近,三角洲前缘残留层发育,底部滑移变形层可以很薄,亦可滑移、拉伸变形层均存在,但碎屑流段不发育
滑塌成因砂体		 滑塌变形层理 包卷层理 火焰构造 泥岩撕裂屑 砂岩透镜体 泥砾	 ABCDE组合 ABCE组合	 E D C B	滑移距离中等,坡移砂体纵向上序列最完整,块状碎屑流所占的比例增大,前缘残留层逐渐消失
碎屑流成因砂体		 椭圆形红色漂砾 泥岩撕裂屑 红色泥砾 泥岩撕裂屑 炭屑成层富集	 ABE组合 AE组合	 E B	滑移距离远,以块状碎屑流段为主,可残留滑移变形层段

A—暗色泥岩; B—滑移变形层; C—拉伸变形层; D—前缘残留层; E—块状碎屑流段

图 1 坡移砂体类型及其沉积模式

Fig. 1 Types of slop-shifting sand body and its sedimentary model

3 重力流砂体的识别

在三角洲前缘斜坡重力流成因砂体类型划分的基础上,多角度对比三角洲前缘-坡移扇-浊积岩砂体特征,建立三角洲前缘重力流成因砂体的识别标志。

3.1 沉积构造特征

3.1.1 滑动成因砂体

三角洲前缘的朵叶体在自身重力、洪水或波浪等作用下,与三角洲主体分离,在重力作用下沿相对平直的滑移面向前滑移,尚未发生明显变形即再次沉积下来的砂体,称之为滑动成因砂体。由于滑移的距离较近,处于半固结的状态的三角洲朵叶内部

基本保持了三角洲前缘的层理构造,仅在底部的砂泥岩接触面之上发育滑动变形层段,同沉积变形作用较少。滑动成因砂体在岩心上自下而上表现为底部滑移变形层、上部三角洲前缘残留层的纵向序列模式。该类砂体最难与三角洲前缘区分,两者内部的沉积构造特征极为相似,因此作为底部滑移面的滑移变形层是鉴别该类砂体的重要标志。岩心特征上表现为砂岩底部发育大量泥岩撕裂屑(泥质角砾岩)(图 2(a)),撕裂屑表现出较强的定向性,近平行于砂泥接触面,是整个块体水平滑移的产物。另外,砂体内部可见滑脱断层(图 2(b))、液化砂岩脉(图 2(c))和砂质注入体(图 2(d))等。

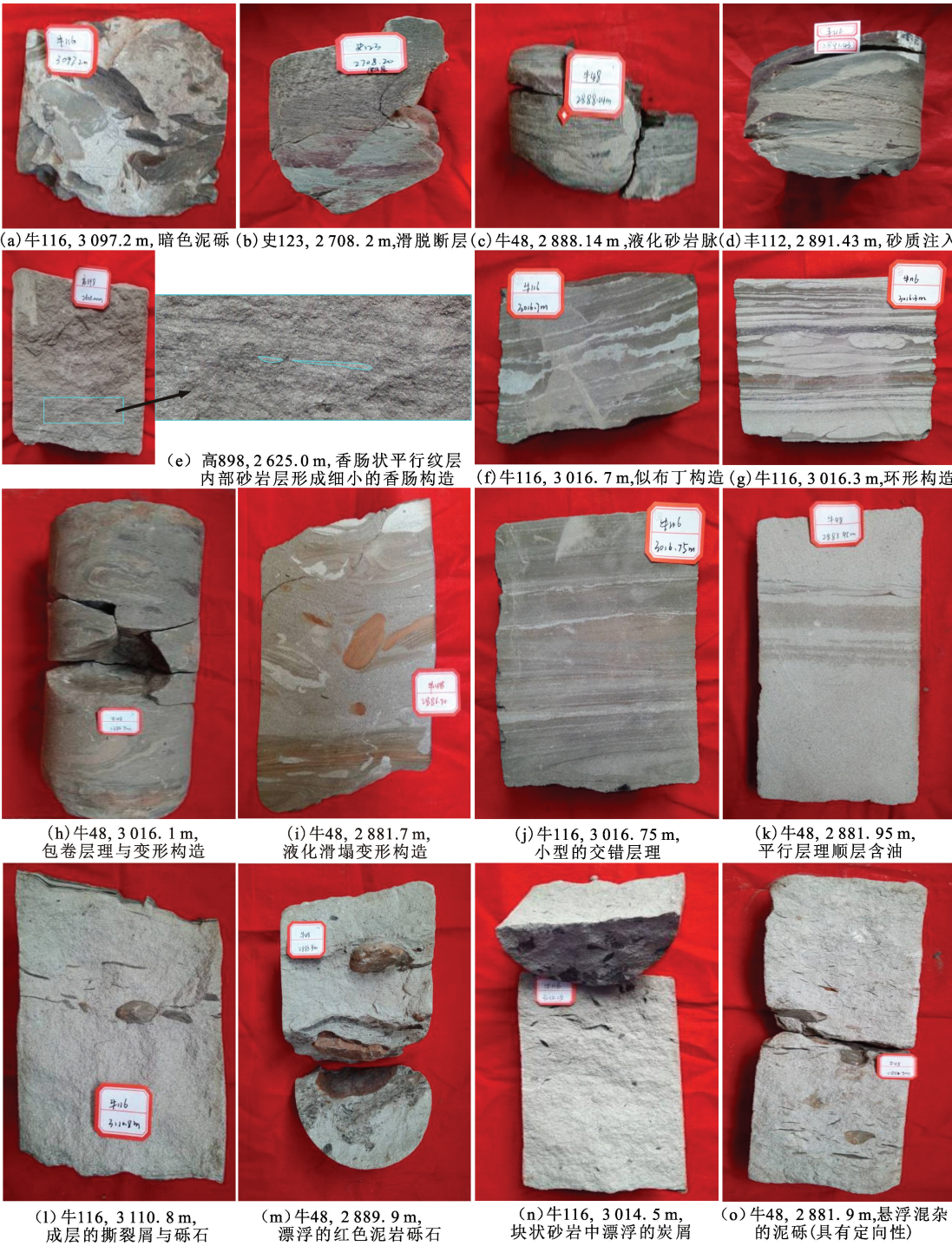


图 2 坡移扇典型岩心沉积特征

Fig. 2 Core features of slope-shifting sand body

3.1.2 滑塌成因砂体

当三角洲前缘的斜坡坡角较大时,发生断裂的朵叶体滑移距离较远才能再次沉积下来,在滑移的过程中块体会发生旋转变形,因此在块体的底部发生强烈的变形,泥岩撕裂屑较难保存下来,岩心上表现为滑塌变形构造和搅浑构造,偶见包卷层理、流动成因褶皱(图 2(h)、(i));块体核部与底部之间发

育拉伸变形层段,半固结的朵叶体局部受拉伸作用的影响发生准同生变形,岩心上变现为拉伸作用力控制下的似布丁构造、“香肠状”平行纹层和透镜状砂岩等(图 2(e)~(g)),是块体整体滑移的另一有力证据;块体的核部仍然是三角洲前缘残留层,由于滑移距离较远,块体整体发生旋转,因此反映牵引流沉积特征的层理构造往往被破坏,仅残存一些小型

的交错层理(图4(j))或变得比较模糊的粒序层理,另外可见块状砂岩中顺层含油的特征(图4(k)),从油迹上看表现为平行层理,因此推测三角洲前缘砂体内的平行层理在搬运过程中被改造成块状层理;块体的顶部发育砂质碎屑流,滑移距离越远,顶部砂质碎屑流的厚度越厚,核部的残留层段所占的比例越小。从岩心特征上来看,滑塌成因砂体是纵向序列模式最完整的砂体类型(包括ABCDE组合和ABCE组合)。

3.1.3 碎屑流成因砂体

当滑塌成因砂体继续向坡脚处滑移,其顶部的碎屑流段厚度超过50%,且核部三角洲前缘残留层消失后,便转化为碎屑流成因砂体。从岩心上看,整体表现为大套的纯色块状砂岩,单层厚度可达8~10 m。根据沉积特征可进一步细分为多个期次,两期之间存

在突变接触面,可见典型的槽模或沟模构造,有的层间发育成层的炭屑,具有明显的研磨痕迹。块体的内部可见红色泥岩漂砾或暗色成层性好的泥砾,泥砾间夹大量炭屑(图2(l)~(n));另外,局部可见一些无序的泥砾和撕裂屑(图2(o)),推测为碎屑流完全转化形成前的过渡状态。碎屑流成因砂体在纵向序列上多表现为ABE组合和AE组合模式。

3.2 粒度特征

沉积物的粒度除了受搬运介质、搬运方式等因素影响之外,还取决于其形成时的沉积环境,因此可以利用粒度资料来确定沉积环境。从粒度分析资料来看,三角洲前缘朵叶体粒度概率累计曲线以三段式或两段式为主,其中跳跃次总体的斜率较大,反映了水动力作用较强,砂体分选较好,C-M图上以代表牵引流的OP/PQ段为主(图3)。

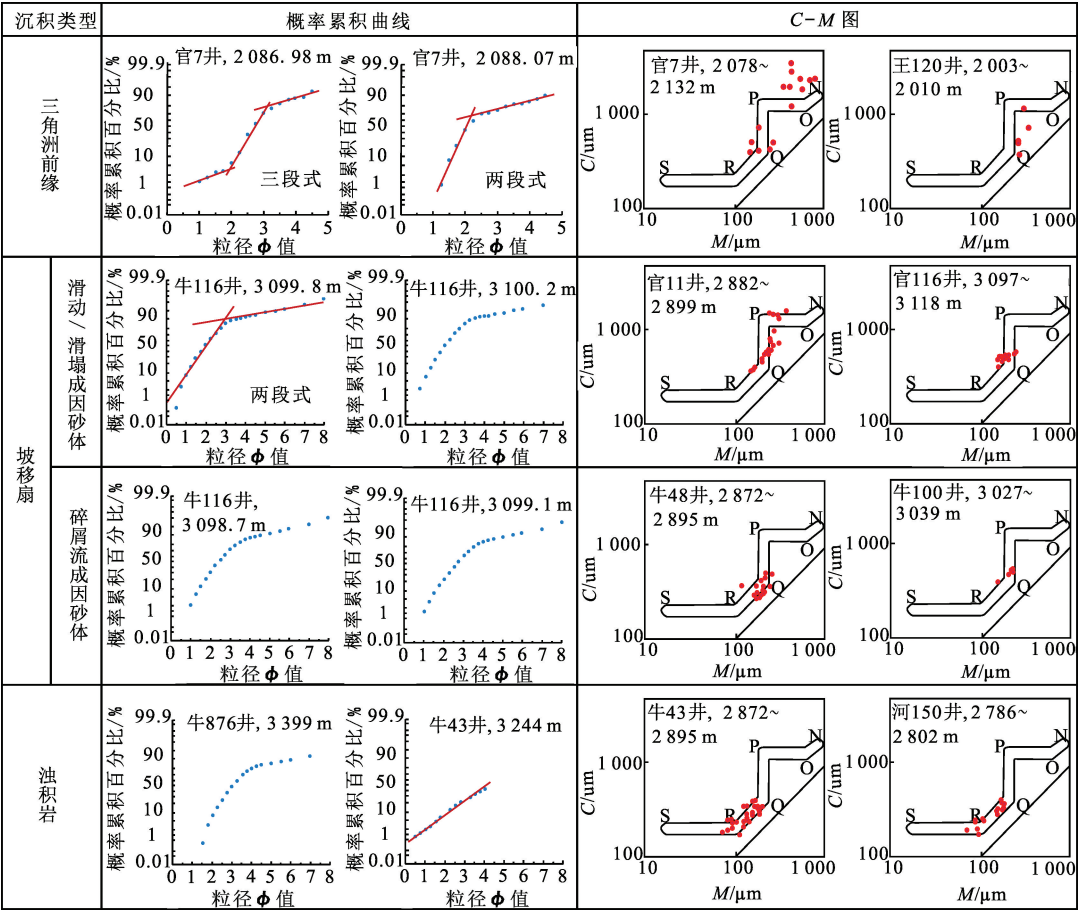


图3 三角洲前缘-坡移扇-浊积岩粒度特征对比

Fig.3 Grain size characteristics comparison of delta front sand, slop-shifting sand and turbidite

坡移扇砂体的粒度概率累积曲线类型比较多,包括三段式、两段式和宽缓上拱式3类。其中,三角洲前缘残留层段多以三段式和两段式为主,而滑移变形层以宽缓上拱式为主。坡移扇砂体C-M图可分为两

类,第一类为PQ为主的牵流程型,多为滑动成因砂体与滑塌成因砂体,另一类为PQ/QR为主的复合型,多为碎屑流成因砂体。浊积岩的粒度概率累积曲线以宽缓上拱式和单段式为主,其C-M图粒度特征上

表现为 QR 为主的浊积岩型,反映了典型的递变悬浮沉积,其最大的特点即 C 与 M 成比例地增加, C 值随 M 值相应变化,从而使这段图形与 C - M 基线平行。由此可见,坡移扇兼具牵引流和重力流的粒度特征,其中滑动、滑塌只是半固结的三角洲前缘发生位移变形,沉积组分变化不大,更多的表现出牵引流的特征,随着搅浑程度的加大,逐渐向重力流转化,到碎屑流成因砂体粒度特征比较接近浊积岩。

3.3 测井相特征

三角洲前缘、坡移扇及浊积岩砂体在测井相上

表现出差异性特征,三角洲前缘砂体自然电位 SP 曲线与自然伽马 GR 曲线均表现为反旋回漏斗型;坡移扇砂体特征可划分为两类,其中滑动和滑塌砂体 SP 曲线特征表现为漏斗-箱型复合型,GR 曲线表现为齿化箱型;碎屑流砂体 SP 曲线特征表现为漏斗型,GR 曲线表现为齿化漏斗型;浊积岩砂体 SP 曲线特征表现为指状或钟型,GR 曲线表现为齿化钟型(图 4)。

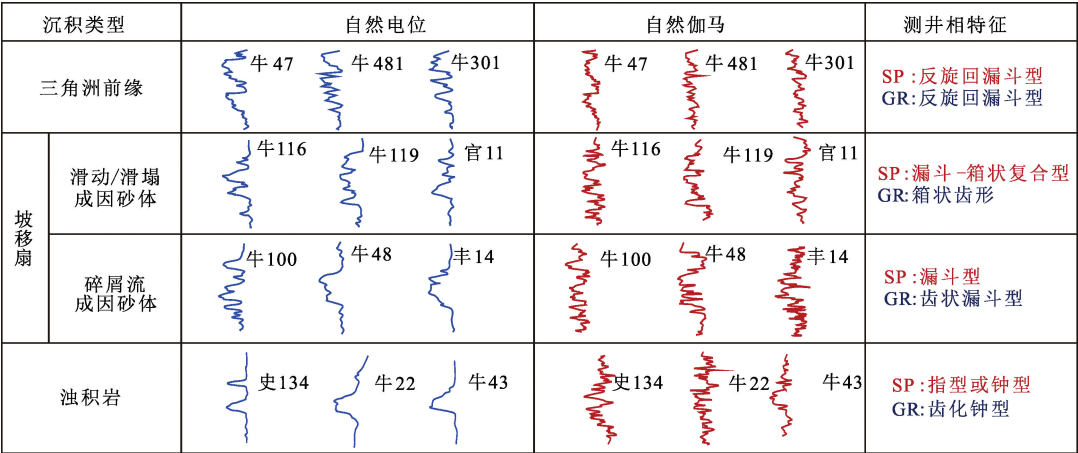


图 4 三角洲前缘-坡移扇-浊积岩测井相特征对比

Fig. 4 Logging characteristics comparison of delta front sand, slop-shifting sand and turbidite

3.4 地震相特征

三角洲前缘砂体在地震相上表现出多套前积反射、连续性好的特征。坡移扇的地震相特征可分为 3 类,滑动成因砂体在地震相上表现为前积层靠近根部断开,波形为单波,中强反射、连续性好;滑塌成

因砂体在地震相上表现为前积层内伴生同沉积断层,开始出现复波,中强反射、延伸广;碎屑流成因砂体在地震相上位于底积层之上,单波或复波,中弱反射、连续性差;浊积岩在地震相上位于底积层附近,中弱反射,延伸窄(图 5)。

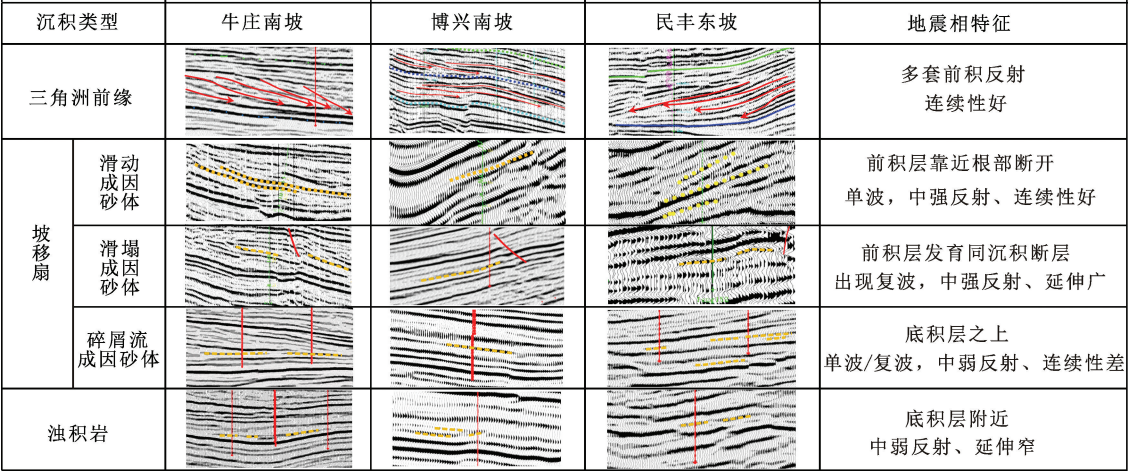


图 5 三角洲前缘-坡移扇-浊积岩地震相特征对比

Fig. 5 Seismic characteristics comparison of delta front sand, slop-shifting sand and turbidite

4 重力流砂体形成条件

本文中研究表明,三角洲前缘斜坡重力流成因砂体的形成与展布受控于古物源、古沉积坡角、同沉积断层和沉积基准面旋回变化等因素,其中充足的物源是重力流砂体发育的物质基础、适宜的古坡角是重力流砂体有序展布的必要条件、同沉积断层下降盘是砂体发育的有利区,而基准面旋回变化决定了重力流砂体的纵向分布样式。

4.1 充足的物源是重力流砂体发育的物质基础

东营凹陷东部沙三中亚段沉积时期,主要发育三支物源的三角洲,依次为陈官庄三角洲、东营三角洲和永安镇三角洲,早期主要发育东南物源的东营三角洲,后期南部的陈官庄三角洲和东北部的永安镇三角洲逐渐增强,表现为多物源汇聚

的特点。 Z_6 沉积时期,东南物源的东营三角洲物源供给量充足,在三角洲前方开阔的斜坡带依次发育坡移扇和浊积岩, Z_5 沉积时期,南部物源逐渐增强,重力流砂体的核心发育区向南部迁移,至 Z_4 沉积时期,重力流发育区演化为南北两个核心区。能够表征物源供给速率的参数很多,可以划分为成正比的参数和成反比的参数^[22],本文中选取 10 个反映物源供给能力的参数计算了物源供给指数,以郝 2—莱 75 井近东西向沉积相与物源供给指数叠合剖面图为例, Z_2 沉积早期、 Z_3 沉积早期、 Z_4 沉积时期以及 Z_5 沉积末期的重力流砂体相对发育,其对应的物源供给指数介于 0.6~0.8,物源供给指数低于 0.6 的沉积时期,三角洲前缘斜坡的重力流砂体相对不发育(图 6)。

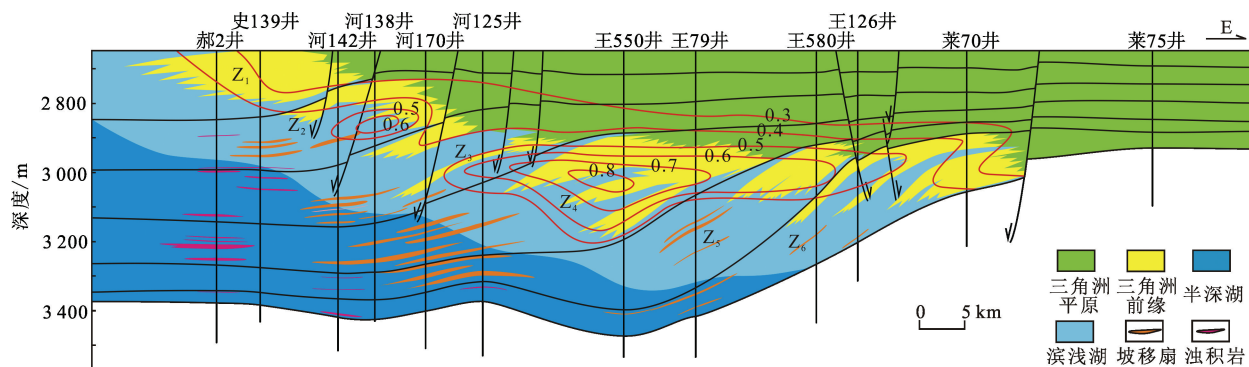


图 6 郝 2—莱 75 井物源供给指数与沉积相展布叠合剖面

Fig. 6 Congruent profile of source supply index and distribution of sedimentary facise from well Hao2 to Lai75

4.2 同沉积断层下降盘是重力流砂体发育的有利区

活动的同沉积断层是三角洲前缘朵叶体发生断裂的直接触发因素,因此同沉积断层的下降盘往往是重力流砂体发育的有利区。同沉积断层与三角洲前缘推进距离的匹配程度以及断层的活动性决定了重力流砂体的发育程度。以牛庄南部地区史 131—王 23 剖面为例,计算王 39 分支断层、王 23 断层和王 116 断层的生长指数,分析表明牛 116、牛 100、牛 48 井区的坡移扇受控于活动强烈的王 23 断层。 Z_4 沉积时期,三角洲前缘的推进距离与王 23 断层合理匹配,其前方重力流砂体最为发育,牛 116 与牛 100 井区坡移扇叠合连片(图 7)。从层系上来看, Z_5 、 Z_4 断层生长指数最高(大于 1.5),最有利于重力流砂体的发育。

4.3 适宜的古坡角是重力流砂体有序展布的必要条件

适宜的坡角和开阔的沉积背景是坡移扇发育必要条件,只有当坡角适宜且前方具有开阔的沉积背景时,断开的块体才能依次转化,成带分布;坡角过缓,沿坡面的剪应力小,缺少坡移滑动的动力,仅表现为三角洲前缘被夷平,前缘内部斜交角变平缓;坡角过陡,易快速滑塌、急速转化,亦可形成深水浊积扇(图 8)。本文研究过程中对比了现今坡角、层拉平恢复古坡角、滨线轨迹法恢复古坡角^[23-24]等多种方法,分析表明现今坡角不能反映沉积时期的古坡角,层拉平法不适用于快速进积、在地震剖面上表现为“三层结构”的三角洲前缘坡角的恢复,最终选取基于滨线轨迹的古坡角恢复方法对沉积时期的古坡角进行恢复,结果表明,有利于重力流砂体有序展布的古坡角为 $1.1^{\circ} \sim 2.1^{\circ}$ 。

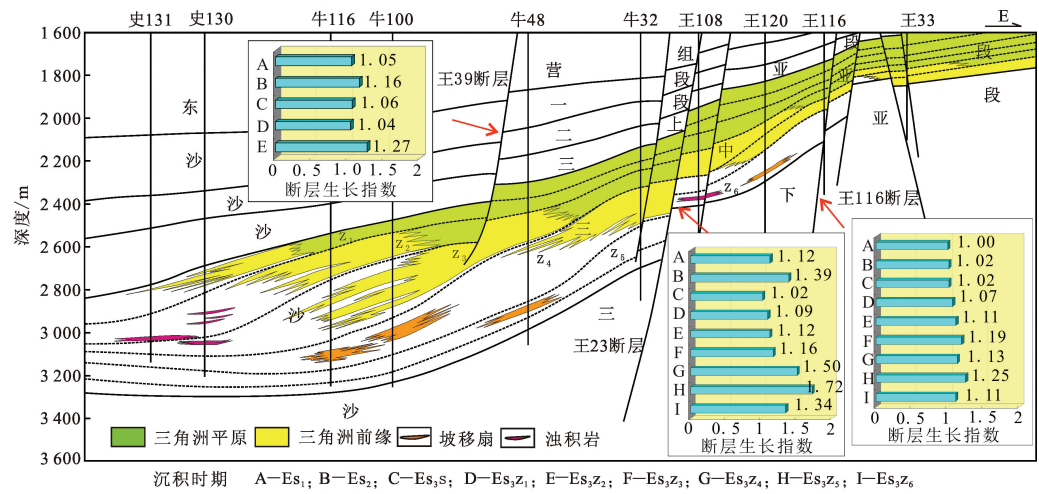


图 7 史 131—王 33 井重力流砂体展布与断层生长指数关系剖面

Fig. 7 Relationship profile of gravity flow sand distribution and fault activity from well Shi131 to Wang33

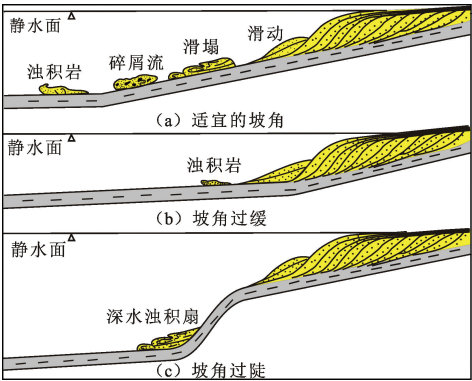


图 8 三角洲前方坡折类型决定坡移扇发育及展布模式

Fig. 8 Distribution model graph of slop-shifting sand determined by slope type in the front of delta

4.4 沉积基准面旋回变化决定了重力流砂体的纵向分布样式

沙三中 Z_4 沉积时期重力流砂体在垂向上一般为 2~3 套,单套砂体叠合连片,但砂体叠合处岩性和物性变化较大,整体表现为纵向分层、密集发育的分布样式。精细层序划分研究表明低级序层序界面附近发育坡移扇,坡移扇往往发育在短期基准面下降半旋回到上升半旋回的转化面附近(图 9)。基准面下降半旋回,三角洲快速进积,为坡移扇的发育提供物源;在旋回转换面上同沉积断层、洪水等触发机制下,坡移扇规模发育;基准面上升半旋回:水体逐渐加深,有利于坡移砂体保存。

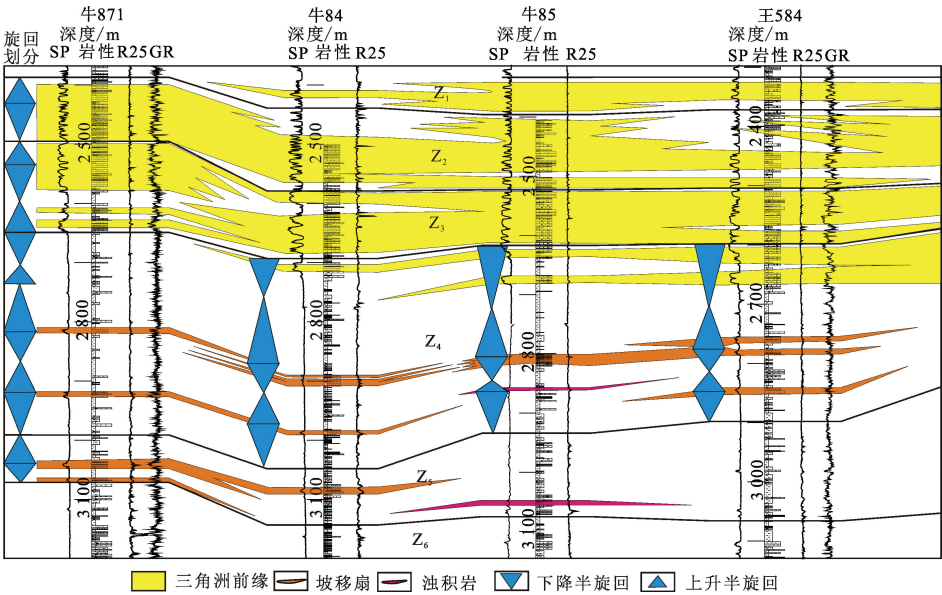


图 9 牛 873—牛 109 井重力流砂体分布与短期基准面旋回关系剖面

Fig. 9 Relationship profile of gravity flow sand distribution and short-term base-level cycle from well Niu873 to Niu109

5 结 论

(1) 东营凹陷南坡大型三角洲前缘斜坡重力流成因砂体类型多样,处于三角洲前缘斜坡的朵叶体在外界因素影响下发生断裂,在重力作用下向前滑动、滑塌、碎屑流化,最终才转化为浊流。在浊流形成之前,在合适的古地形背景下,可形成一些列重力流成因砂体,统称为坡移扇,坡移砂体并非由单一流体形成,包含了塑性体、砂质碎屑流及浊流等多种流体的有序转化和多个岩相组合。

(2) 根据砂体纵向上序列组合的差异,可把坡移扇划分为滑动成因砂体、滑塌成因砂体、碎屑流成因砂体三种类型,其中滑动成因砂体一般表现为底部滑动变形层段、上部为三角洲前缘残留层砂体的组合模式;滑塌成因砂体顶部开始出现砂质碎屑流,越靠近坡脚处,核部前缘残留层逐渐变薄,甚至完全消失;当块状转化为碎屑流时,其核部已完全消失,但可在底部残存很薄的滑移变形层,利用岩心沉积构造特征、粒度特征、测井相和地震相等多角度可识别砂体类型。

(3) 三角洲前缘斜坡重力流成因砂体的形成与展布受控于古物源、古沉积坡角、同沉积断层和沉积基准面旋回变化等因素,其中充足的物源是重力流砂体发育的物质基础、适宜的古坡角是重力流砂体有序展布的必要条件、同沉积断层下降盘是砂体发育的有利区,而基准面旋回变化决定了重力流砂体的纵向分布样式。

参考文献:

- [1] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier Pub Co, 1962: 88-123.
- [2] SHANMUGAM G. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackford group), Quachita mountains, Arkansas and Oklahoma: reply [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81: 476-491.
- [3] SHANMUGAM G, BLOCH R B, DAMUTH J E, et al. Basin floor fans in the North Sea: sequence stratigraphic models vs sedimentary facies: reply [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81: 662-672.
- [4] 李相博, 卫平生, 刘化清, 等. 浅谈沉积物重力流分类与深水沉积模式 [J]. 地质论评, 2013, 59(4): 607-614.
LI Xiangbo, WEI Pingsheng, LIU Huaqing, et al. Discussion on the classification of sediment gravity flow and the deep-water sedimentary model [J]. Geological Review, 2013, 59(4): 607-614.

- [5] 李相博, 刘化清, 完颜容, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂质碎屑流储集体的首次发现 [J]. 岩性油气藏, 2009, 21(4): 19-21.
LI Xiangbo, LIU Huaqing, WANYAN Rong, et al. First discovery of the sandy debris flow from the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(4): 19-21.
- [6] 鲜本忠, 万锦峰, 姜在兴, 等. 断陷湖盆洼陷带重力流沉积特征与模式: 以南堡凹陷东部东营组为例 [J]. 地质前缘, 2012, 19(1): 121-135.
XIAN Benzong, WAN Jinfeng, JIANG Zaixing, et al. Sedimentary characteristics and model of gravity flow deposition in the depressed belt of rift lacustrine basin: a case study from Dongying Formation in Nanpu Depression [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(1): 121-135.
- [7] 鲜本忠, 万锦峰, 董艳蕾, 等. 湖相深水块状砂岩特征、成因及发育模式: 以南堡凹陷东营组为例 [J]. 岩石学报, 2013, 29(9): 3287-3299.
XIAN Benzong, WAN Jinfeng, DONG Yanlei, et al. Sedimentary characteristics, origin and model of lacustrine deep-water massive sandstone: an example from Dongying Formation in Nanpu depression [J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 3287-3299.
- [8] 陈飞, 胡光义, 孙立春, 等. 鄂尔多斯盆地富县地区上三叠统延长组砂质碎屑流沉积特征及其油气勘探意义 [J]. 沉积学报, 2012, 30(6): 1042-1052.
CHEN Fei, HU Guangyi, SUN Lichun, et al. Sedimentary characteristics and the significance of petroleum exploration of sandy debris flows of Yanchang Formation of the Upper Triassic, Fuxian Area, Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(6): 1042-1052.
- [9] 张雷, 李振海, 张学娟, 等. 重力流沉积岩相划分及其发育规律 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(1): 17-24.
ZHANG Lei, LI Zhenhai, ZHANG Xuejuan, et al. Lithofacies classification and development rule of gravity flows deposits [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(1): 17-24.
- [10] 尹太举, 张昌民, 李中超. 东营凹陷滑塌浊积岩沉积特征及油气藏勘探技术 [J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 93-98.
YIN Taiju, ZHANG Changmin, LI Zhongchao. Depositional characteristic of fluxoturbidite and exploration technologies of subtle reservoirs in the Dongying Sag [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(1): 93-98.
- [11] 陈秀艳, 师晶, 徐杰. 渤海湾盆地东辛油田沙三中亚段重力流沉积砂体类型及含油性 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 594-601.
CHEN Xiuyan, SHI Jing, XU Jie. Types and oil potential of gravity flow sandbodies in the middle Es³ of

- Dongxin oilfield, the Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 05: 594-601.
- [12] 陈永红. 惠民凹陷沙三段三角洲前缘滑塌浊积砂体发育规律与油气聚集关系[D]. 广州: 中国科学院研究生院, 2006.
- CHEN Yonghong. The developing rule of delta-forward creeping turbidite sandbody and its oil-gas accumulation relationship of Sha 3 member in Huimin Depression [D]. Guangzhou: The Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [13] 鄢继华, 陈世悦, 姜在兴. 三角洲前缘浊积体成因及分布规律研究[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(1): 16-19, 25.
- YAN Jihua, CHEN Shiyue, JIANG Zaixing. Genesis and distribution regularity of the turbidite bodies in the delta front [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2008, 30(1): 16-19, 25.
- [14] 操应长, 刘晖. 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[J]. *地质论评*, 2007, 53(4): 454-459.
- CAO Yingchang, LIU Hui. Discussion on the relationship between distribution of fluxoturbidite and depositional slope of delta in lacustrine basin [J]. *Geological Review*, 2007, 53(4): 454-459.
- [15] 吴崇筠, 李纯菊, 刘国华, 等. 断陷湖盆中的浊积岩[C]//中国石油地质委员会. 碎屑岩沉积相研究. 北京: 石油工业出版社, 1988: 1-17.
- [16] 王居峰, 郑和荣, 苏法卿. 东营凹陷中带沙河街组三段浊积体储层特征类型与成因[J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(5): 528-532.
- WANG Jufeng, ZHENG Herong, SU Faqing. Reservoir characteristics and genesis of turbidite fans in the 3rd member of Shahejie Formation in central Dongying depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(5): 528-532.
- [17] 王居峰, 蔡希源, 邓宏文. 东营凹陷中央洼陷带沙三段高分辨率层序地层与岩性圈闭特征[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(4): 7-11.
- WANG Jufeng, CAI Xiyuan, DENG Hongwen. High-resolution sequence stratigraphy and lithologic trap characteristics of Sha-3 member in the central sag of Dongying Depression [J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 2004, 28(4): 7-11.
- [18] 方勇, 邓宏文, 王红亮, 等. 东营三角洲高频层序特征与岩性圈闭分布[J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(3): 160-163.
- FANG Yong, DENG Hongwen, WANG Hongliang, et al. High frequency sequence and lithologic trap distribution in Dongying delta [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2003, 17(3): 160-163.
- [19] 李宇志, 毕明威, 刘惠民, 等. 沙三中亚期东营三角洲前缘滑塌浊积岩定量预测[J]. *地学前缘*, 2012, 19(1): 146-155.
- LI Yuzhi, BI Mingwei, LIU Huimin, et al. Quantitative prediction of slump turbidites of the Dongying delta front in mid Es₃ [J]. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(1): 146-155.
- [20] 鄢继华, 陈世悦, 姜在兴, 等. 断陷湖盆震浊积岩成因模拟实验[J]. *古地理学报*, 2007, 9(3): 277-282.
- YAN Jihua, CHEN Shiyue, JIANG Zaixing, et al. Simulating experiment on genesis of seismo-turbidites in rift lacustrine basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2007, 9(3): 277-282.
- [21] 刘鑫金, 刘惠民, 宋国奇, 等. 东营凹陷洼陷斜坡带坡移扇沉积特征及展布模式[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(4): 1-10.
- LIU Xinjin, LIU Huimin, SONG Guoqi, et al. Sedimentary characteristics and distribution pattern of the slope-shifting fan in the low-lying slope zone of Dongying sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(4): 1-10.
- [22] 宋国奇, 王延章, 路达, 等. 山东东营凹陷南坡地区沙四段纯下亚段湖相碳酸盐岩滩坝发育的控制因素探讨[J]. *古地理学报*, 2012, 14(5): 565-570.
- SONG Guoqi, WANG Yanzhang, LU Da, et al. Controlling factors of carbonate rock beach and bar development in lacustrine facies in the Chunxia submember of Member 4 of Shahejie Formation in south slope of Dongying Sag, Shandong Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(5): 565-570.
- [23] 康波, 解习农, 杜学斌, 等. 基于滨线轨迹的古水深定量计算新方法: 以古近系沙三段东营三角洲为例[J]. *沉积学报*, 2012, 30(3): 443-450.
- KANG Bo, XIE Xinong, DU Xuebin, et al. A new paleobathymetric approach based on shoreline trajectory: an example from Dongying delta in the third member of Paleogene Shahejie Formation [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(3): 443-450.
- [24] 刘军钊, 简晓玲, 康波, 等. 东营凹陷东营三角洲沙三段中亚段古地貌特征及其对沉积的控制[J]. *油气地质与采收率*, 2014, 21(1): 20-23.
- LIU Jun'e, JIAN Xiaoling, KANG Bo, et al. Paleogeomorphology of the middle part of 3rd member of Shahejie formation and their effects on depositional systems, Dongying delta, Dongying depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2014, 21(1): 20-23.