文章编号:1673-5005(2016)05-0010-12

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2016.05.002

东营凹陷东部始新世三角洲供给型重力流 沉积特征与模式

鲜本忠^{1,2},王 璐^{1,3},刘建平¹,路智勇⁴, 李宇志⁴,牛栓文⁴,朱永飞¹,洪方浩¹

(1. 中国石油大学地球科学学院,北京 102249; 2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 3. 中国石油集团测井有限公司长庆事业部、陕西西安 710201; 4. 中国石化胜利油田东辛采油厂,山东东营 257094)

摘要:基于岩相分析、流体成因解释、平面沉积相和同生断层编图,对渤海湾盆地东辛地区始新统湖相三角洲供给型浊积体系的沉积特征及沉积模式进行研究。结果表明:研究区发育滑动、滑塌、碎屑流和浊流4类9种深水异地沉积过程;三角洲前缘斜坡脚和同生断层下降盘控制了滑动、滑塌体,而断层活动微弱的深水低洼区控制了碎屑流沉积;由于深水沉积区规模小,以及同生断层对局部地貌的控制,深水搬运距离短,导致从滑动、滑塌到浊流的流体转换过程发育不完整,形成以碎屑流或滑塌为主的深水沉积体系;碎屑流主控下的重力流水道可能因为滑水搬运机制而缺乏连续性砂岩沉积;研究有助于深化陆相三角洲供给型重力流沉积的理解,也能为该类砂岩储层的有效预测提供地质模型。

关键词:重力流;碎屑流;沉积特征;沉积模式;三角洲供给型浊积体系;东营凹陷

中图分类号:TE 121.3 文献标志码:A

引用格式:鲜本忠,王璐,刘建平,等. 东营凹陷东部始新世三角洲供给型重力流沉积特征与模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(5):10-21.

XIAN Benzhong, WANG Lu, LIU Jianping, et al. Sedimentary characteristics and model of delta-fed turbidites in Eocene eastern Dongying Depression[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(5):10-21.

Sedimentary characteristics and model of delta-fed turbidites in Eocene eastern Dongying Depression

XIAN Benzhong^{1,2}, WANG Lu^{1,3}, LIU Jianping¹, LU Zhiyong⁴, LI Yuzhi⁴, NIU Shuanwen⁴, ZHU Yongfei¹, HONG Fanghao¹

- (1. College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
- 2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
 - 3. Changging Business Division, CNPC Logging Group, Xi'an 710201, China;
 - 4. Dongxin Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257094, China)

Abstract: Based on lithofacies analysis, original interpretation and mapping of sedimentary facies and growth faults, the dominating sedimentary process and depositional model of delta-fed turbidites are studied for the Eocene Dongying Depression, Bohai Bay Basin. The results show that there are four deep-water sedimentary processes in the study area: slide, slump, debris flow and turbidity current, which can be further subdivided into nine deposition types. Slide and slump are generally

收稿日期:2016-03-19

基金项目:国家自然科学基金项目(41172104,41272133,41372117);国家油气重大专项(2011ZX05009-002, 2011ZX05014-001);中国石油大学(北京)科研基金项目(KYJJ2012-01-06)

restricted to the foot of delta front and the down-wall side of growing faults with strong activities, while debrites usually deposit at low-lying areas with weak fault activity and far from foot of delta front. Transportation distance of gravity flow in the study area is short due to restriction by small-scale deep water area and local landform controlled by activities of fault, which lead to incomplete development of gravity flow from slide, slump to turbidity current. As a result, there is a possible lack of continuous sandstone in gravity flow channels caused by "hydroplaning" of debris flows. These findings are helpful to understand sedimentary characteristics of turbidites fed by lacustrine delta, and have significant applications in prediction of turbidites sandstone reservoir.

Keywords: gravity flow; debris flow; sedimentary characteristics; depositional model; turbidite system fed by delta; Dongying Depression

在海相深水油气勘探的巨大成功[1] 和砂质碎 屑流[2]、联结性碎屑流沉积[34]等重力流沉积新思 想的影响下,近年来湖相重力流沉积引起了国际沉 积学界的广泛关注[5-7],并在中国松辽盆地[8-9]、鄂 尔多斯盆地[10-11] 和渤海湾盆地[12-13] 发现了大量湖 相重力流砂岩油气藏,显示了陆相重力流油气勘探 开发的巨大潜力。按照"源-汇"系统思想,湖相盆 地中发育陡坡线状物源斜坡群、缓坡点状物源湖底 扇和三角洲前缘多点物源浊积扇 3 类重力流沉 积[14]。其中,三角洲供给型重力流沉积广泛发育于 断陷和拗陷湖相沉积盆地,在鄂尔多斯延长组、渤海 湾盆地东营凹陷、西部凹陷和南堡凹陷沙河街组、东 营组开展了大量研究[15-16]。研究证实,湖相深水沉 积中发育砂质碎屑流、泥质碎屑流、浊流、滑塌等沉 积类型,其中砂质碎屑流、浊流和砂质滑塌体是其中 可能的油气储层[13,17];厘定了砂质碎屑流识别的关 键标志[10,13]和简要的沉积模式[18-19]:讨论了构造活 动[20]和火山喷发作用对深水沉积过程的影响[21]。 但是,由于缺乏现代深水沉积过程监测的约束,目前 对在盆地规模、水深、水动力条件、基准面变化和物 源供给条件等方面与海相盆地存在明显差异的湖相 盆地中三角洲供给型重力流沉积过程仍然缺乏深入 的理解,对其流体类型、沉积过程特殊性及其对深水 沉积单元形成及沉积特征的影响缺乏深入的认识。 笔者基于岩相分析与统计、测井及地震沉积学研究, 对中国湖相浊积岩勘探历史最长的渤海湾盆地东营 凹陷东辛地区沙河街组三段中亚段(沙三中亚段) 三角洲供给型深水沉积的岩相组成、沉积过程、控制 因素及发育模式开展研究。

1 区域地质概况

东营凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷的东南部, 是一个呈北东向展布的、北断南超、西断东超的不对 称半地堑式断陷盆地。其四周凸起环绕,东接青坨子凸起,西临青城凸起,北靠陈家庄凸起和滨县凸起,北部以陡坡带为界,南靠广饶凸起和鲁西隆起,东西总长约 90 km,南北宽 65 km,总面积约 5 700 km²。研究区位于东营凹陷东部的东辛地区,北临民丰洼陷,西接利津洼陷,南靠牛庄洼陷,构造上位于中央断裂带的中东部,是辛镇、广利、新立村和永安镇这四大构造带的结合部(图 1)。

东营凹陷古近系细分为孔店组($E_{1-2}k$)、沙河街组($E_{2}s$)、东营组($E_{3}d$)。其中,沙河街组自下而上分为沙河街组四段($E_{2}s_{4}$)、沙河街组三段($E_{2}s_{3}$)、沙河街组二段($E_{2}s_{2}$)和沙河街组一段($E_{3}s_{1}$)。而 $E_{2}s_{3}$ 又分为3个亚段:上亚段($E_{2}s_{3}$)、中亚段($E_{2}s_{3}$)和下亚段($E_{2}s_{3}$)。

以东营三角洲快速发育的 E_2s_3 ⁺ 为目的层位, 利用研究区 38 口取心井、968 m 岩心观察和 318 口钻测井和全覆盖三维地震资料,通过岩相细分及其成因解释,分析三角洲供给型重力流沉积特征、控制因素及发育模式。

2 沉积特征

2.1 岩相特征

采用岩石宏观沉积构造、结构特征和岩石类型 相结合的方法,对研究区深水异地沉积的岩相类型 开展了识别划分。岩心观察结果显示,研究区深水异地沉积主要由砂岩、泥岩和砂-泥过渡类型构成,据此将研究区岩相划分为砂岩、泥岩和砂-泥过渡3大类(表1)。其中,砂岩类可细分为9种岩相,泥岩可分为3种,过渡类型可分为2种。在968m岩心中识别出524个重力流岩相单元。其中,砂岩类岩相单元占415个,纯净块状砂岩相、含漂砾块状砂岩

相和变形层理泥质砂岩相钻遇层数最多,分别为219、48和45层,三者共占重力流砂岩岩相的75%、分别占总重力流砂岩岩相的53%、12%和11%。此外,含泥岩撕裂屑块状砂岩相发育41次,占10%,正递变砂岩相发育38次,占9%,其他岩相发育层数少,频次小,所占比例均小于5%(图2)。

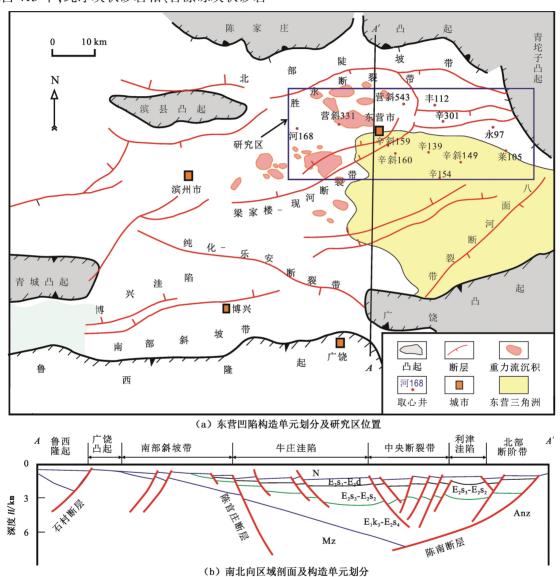


图 1 东营凹陷构造格局平面及剖面图

Fig. 1 Structural framework and regional section of Dongying Depression

从各岩相发育平均厚度看,块状砂岩相明显高于其他重力流砂岩岩相,其累积总厚度达 91.75 m,占砂岩总厚的 45%。此外,含漂砾块状砂岩相、含泥岩撕裂屑块状砂岩相和变形层理(泥质)砂岩相其次,厚度分别为 41.54、25.63 和 23.31 m,占总厚

的比例分别为 20%、13% 和 11%。正递变砂岩相钻 遇层数较多,但单层厚度小,所以其累积厚度仅占总 厚的 6%(图 2,据 38 口井岩心统计,岩相代号详见 表 1)。

| 表 1 东营凹陷东辛地区重力流岩相划 | 划分 |
|--------------------|----|
|--------------------|----|

Table 1 Lithofacies division of gravity flow deposition in Dongxin area, Dongying Depression

| | • | - | | | |
|-------|-------------|------------|--------------|---------------------|--|
| 岩类 | 岩相 | 代号 | 沉积特征 | 成因解释 | |
| | 纯净块状砂岩 | S-1 | 均质,块状,可见碳屑 | | |
| | 含漂砾块状砂岩 | S-2 | 含漂浮砾石 | 砂质碎屑流 | |
| | 含泥岩撕裂屑块状砂岩 | S-3 | 底部多含不规则泥岩撕裂屑 | | |
| | 似平行层理含砾砂岩 | S-4 | 似平行层理 | 泥质碎屑流 | |
| 砂岩 | 杂基支撑砾质砂岩 | S-5 | 含紫红色泥砾,杂基支撑 | | |
| | 正递变砂岩 | S-6 | 正递变层理 | 344 39 5 | |
| | 波纹交错层理(粉)砂岩 | S-7 波纹交错层理 | | 浊流 | |
| | 交错层理(含砾)砂岩 | S-8 | 交错层理,可见反韵律 | 滑动 | |
| | 变形层理(泥质)砂岩 | S-9 | 包卷层理、揉皱层理 | 变形滑塌 | |
| か 泥油人 | 砂质团块(泥质)砂岩 | SM-1 | 砂岩团块,氧化色泥砾 | #にがい垣 1日 | |
| 砂-泥混合 | 含泥岩撕裂屑泥质砂岩 | SM-2 | 含不规则泥岩撕裂屑 | 撕裂滑塌 | |
| | 砂质团块砂质泥岩 | M-1 | 球枕构造,含砂岩团块 | 撕裂滑塌 | |
| 泥岩 | 变形层理(砂质)泥岩 | M-2 | 包卷层理 | 变形滑塌 | |
| | 含漂砾块状泥岩 | M-3 | 夹紫红色泥岩团块/条带 | 泥流 | |

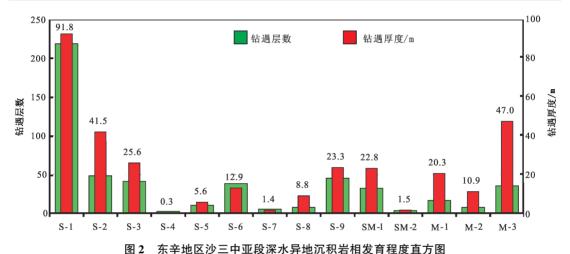


Fig. 2 Statistic result of lithofacies deposited by gravity flows of the third middle sub-member of Shahejie formation in Dongxin area

2.2 成因解释与沉积特征

深水沉积过程非常复杂,而且成因不同在沉积记录上的沉积响应各有不同。为了尽可能恢复研究区来自三角洲滑塌成因的重力流沉积的过程,分成因总结其沉积特征,在此基于岩相分析进行深水沉积成因的细分研究。

在 Middleton 和 Hampton^[24]根据支撑机制的重力流基本分类(碎屑流、液化流、颗粒流和浊流)方案的基础上,赞同 Shanmugam^[2]关于液化流常常不是一种独立的流体、颗粒流极少发育的认识,认为重

力流主要包括碎屑流和浊流两种基本类型(表 2,重力驱动过程中沉积物体积分数是指流体中固体颗粒体积所占的比率或百分比。相应数据来自文献:①砂质碎屑流沉积物体积分数为 25% ~95% [2];②泥质碎屑流沉积物体积分数为 30% ~82% [25];③浊流沉积物体积分数为 1% ~23% [26];④泥流粉砂以下粒级占固体物质的 80% [25])。此外,考虑到滑塌型重力流沉积体系发育过程,识别出滑动、滑塌等块体搬运过程,并根据原沉积变形程度将滑塌细分为撕裂滑塌和变形滑塌。

表 2 研究区深水沉积成因类型、性质及主要特征

Table 2 Liquid properties, transportation and deposition mechanism of different gravity flows in study area

| | 类型 | 流态 | 流变 | 支撑 | 搬运 | 沉积 | 沉积物体 | | 主要特征 | | 代表 | |
|-----|-------|----|------------------|----------------|-----------------|---------------------|--------------|----------------|------------------|----------------------------|--------|-------|
| | 矢望 | 流心 | ^{流心} 特征 | 机制 | 方式 | 机制 | l制 积分数/% | 岩性 | 沉积构造 | 成熟度 | 取心井 | |
| | 滑动 | | 弹性 形变 | | | | | 基本保留 原岩性 | 保留原 沉积构造 | 较高 | 辛斜 160 | |
| 滑 | 撕裂滑塌 | | | | | | | 砂泥混杂 | 砂泥团块 | 低 | 辛 158 | |
| 塌 | 变形滑塌 | | | | 抉 | 块 | 块 | | 砂泥互层 | 包卷层理 | 低 | 河 168 |
| 碎屑流 | 砂质碎屑流 | 层流 | | 分散压力、 基质强度等 | 分散压力、 体 基质强度等 搬 | - 体 - 搬 - 运 ; | 冻结 作用 | 25% ~95% | 含漂砾砂岩、 纯净中细砂岩 | 块状层理、泥 - 岩撕裂屑、砂 岩团块等 | 较高 | 辛 139 |
| | 泥质碎屑流 | | 宾汉 流体 | | | | | 30% ~82% | 混杂,杂基支撑 | | 极低 | 河 168 |
| | 泥流 | | 圣 灰 | | | 大于80% | 泥岩,含粉 砂泥岩 | 块状构造、 泥岩撕裂屑 | 低 | 辛斜 160 | | |
| | 浊流 | 紊流 | 牛顿 流体 | 湍流 | 悬浮 搬运 | 悬浮 沉降 | 1% ~23% | 细砂,粉砂到泥 | 递变层理、 波纹层理 | 较低 | 辛 170 | |

2.2.1 滑动沉积

滑动是指在一定外界条件的触发作用下,沉积物沿着平板状滑脱面在重力作用下向下滑动,其内部并无明显变形,表现脆性形变的力学特性。其发生运动的原因多是前方沉积物失稳,而触发沉积物失稳的因素则主要包括地震、海啸、火山活动以及沉积物在陡坡处的快速堆积等[27-28]。当作用于沉积物上的重力沿斜坡向下的分力不足以克服沉积物的

内聚力时,沉积物作为整体向前搬运,内部保持均一完整,无明显变形构造,因此沉积记录中以保持原始的沉积构造为特征。研究区滑动块体主要来自三角洲前缘,多见交错层理,波纹层理,平行层理等浅水沉积构造,并被深水泥岩单元包围(图3)。由于其沉积特征与三角洲基本一致,导致滑动体的识别需要根据下伏泥岩颜色、所处沉积背景等信息综合判断。

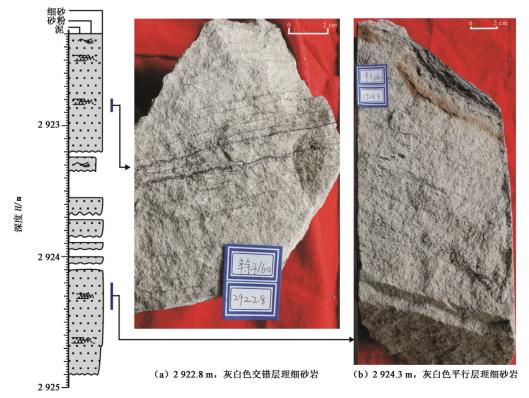


图 3 辛斜 160 井滑动沉积岩心柱状图及照片

Fig. 3 Core photos and core column map of slide in well Xinxie160

2.2.2 滑塌体

滑塌是斜坡沉积物失稳后在下凹的滑移面上发生运动,在自身的重力和旋转剪切力的共同作用下,沉积物内部发生明显的同沉积变形构造的产物,表现出明显的塑性形变力学特性。根据变形程度分为砂质变形滑塌、砂质撕裂滑塌、泥质变形滑塌、泥质撕裂滑塌4个小类。

变形滑塌的岩性多以粉—细砂岩和砂泥岩互层 为主,也见泥岩或砂质泥岩。常见滑塌褶皱单元与 未变形的沉积单元互层,表现出不规则的接触面和 不同规模的包卷层理、滑塌褶皱。

撕裂滑塌是由于变形作用的增强,变形程度加大,已经呈现扭曲的砂层内部内聚力不足以克服外界的作用力,形成透镜状砂岩团块及高度扭曲的杂乱层,多见撕裂状砂质团块、泥质团块和肠状褶皱等沉积现象。

2.2.3 碎屑流沉积

碎屑流是较大的颗粒由基质强度(即黏土-水基质的内聚强度)支撑的沉积物重力流。为了明确与其他重力流的不同,有人称这类代表性的、理想的碎屑流为"真正的碎屑流"^[29]。实际上流体的流变学特征主要受沉积物浓度的控制^[30]。碎屑流是一种具有塑性流变学特征、层流状搬运的流体,沉积上表现出整体冻结方式^[31]。Hampton^[32]首次进行了水下碎屑流模拟实验,并基于模拟实验提出了"砂质碎屑流"的概念。

王德坪^[33]提出了根据不同粒度等级的主要陆源组分,将碎屑流划分为砾质碎屑流、砂质碎屑流、 泥质碎屑流和碳酸盐岩质碎屑流。Shanmugam^[2]指出"砂质碎屑流"代表了黏性与非黏性碎屑流之间的连续作用过程,并在 Shultz^[34]的重力流分类体系基础上将碎屑流细分为砂质碎屑流与泥质碎屑流。研究中,在接受将碎屑流细分为砂质碎屑流和泥质碎屑流的基础上,引进"泥流"^[12]解释含有漂浮砾石(通常是泥砾,偶尔也可见砂质团块和基岩砾石)的块状泥岩。

研究区砂质碎屑流沉积以岩屑长石细砂岩和长石岩屑粉细砂岩为主,成分成熟度较低,石英含量为

38%~47%,长石含量为29%~43%,岩屑含量为12%~30%,粒度概率曲线上常表现出"双峰"特点;块状层理构造为主,与深湖一半深湖泥岩顶底均呈突变接触关系,底部常具有剪切特征的滑动面,顶部常有泥岩撕裂屑、砂质团块等呈漂浮状(图4(a))。泥质碎屑流沉积主要为含砾杂砂岩、砾质长石杂砂岩、泥质砂岩和含砾岩屑砂岩,成分成熟度和结构成熟度均非常低,黏土(杂基)含量高达30%以上。泥、砾、砂混杂,常常可见大的漂浮状外源基岩砾石和氧化色泥岩砾石块体(图4(b))。

泥流沉积是一种发现很早但应用很少的沉积类型。早在1795年春,位于瑞士中北部的韦杰斯镇附近发生了特大规模的陆上碎屑流直接注入卢塞恩湖中,暴雨过后产生了缓慢流动的、高达6m、宽约1km,流动持续了14天的碎屑流。监测表明,其主要物质是灰棕-灰色的均质冰碛黏土,与下伏和上覆的正常湖泊沉积呈鲜明对照,平均粒径一般为10~12μm,黏土级颗粒的含量极高,流体的黏滞度也较大,被称为泥流^[35]。需要说明的是,本文中所定义的泥流与火山学的泥流有所不同,而主要引用工程地质灾害中相应的概念,认为泥流是一种砂、粉砂和泥等细粒物质占固体总量的98%以上,且粉砂以下粒级占固体物质80%以上的流体^[36]。泥流所形成的沉积产物岩性多为块状含粉砂泥岩,可见不规则状紫红色泥岩团块和少量漂浮砾石(图4(c))。

2.2.4 浊流沉积

浊流以紊流支撑颗粒进行搬运,当外力逐渐减小时以悬浮沉降的方式进行卸载。1962 年 Bouma 提出了著名的鲍马序列。研究区内浊流沉积不普遍,浊积岩砂体厚度小于 1 m,甚至小于 0.1 m。部分浊流层发育递变层理,上覆平行层理、小型交错层理或波纹交错层理粉—细砂岩。砂岩粒度概率曲线特征分为两种:一类为弧形或多段式特征,粒度分布范围广、分选极差,属于典型的递变悬浮沉积所致,岩心上常对应于递变层理砂岩段;另一类分选性变好,常常表现为悬浮搬运组分含量相对较高(一般大于 15%)的两段式或两段过渡式搬运,岩心上对应于平行层理、交错层理粉细砂岩。



(a) 辛139井,2840.6m,灰白色块状中-细砂岩,含磨圆良好的漂浮砾石,顶底见泥岩撕裂屑,呈似平行状分布



(b) 河168井,3328.3 m,杂基支撑砾岩质砂岩,部分砾石次圆状、圆状,分选差,上部见直径约10cm的泥质砾石



(c) 辛斜160井,3108.2 m,含紫红色漂浮状泥砾的块状泥岩,泥砾磨圆好,示意其搬运距离较远

图 4 研究区碎屑流沉积岩心照片

Fig. 4 Core photos of debris flow in study area

3 流体成因统计分析

为了了解研究区深水沉积过程的特征,结合岩相的成因解释结果(表1)对岩心中厚度大于0.1 m的单期沉积进行了不同成因深水沉积的钻遇期次和单期沉积厚度、平均沉积厚度的统计分析。

统计结果表明,滑塌体、泥流沉积、砂质碎屑流沉积和滑动沉积的单期最大沉积厚度均可达到 3 m以上;从平均沉积厚度看,泥流沉积居首、泥质滑塌体其次、滑动沉积第三,而砂质碎屑流沉积并不突出,平均单期沉积厚度仅为 0.63 m,浊流沉积更差,平均仅有 0.37 m。

对不同成因钻遇累计沉积厚度^[37]统计结果表明:①研究区内深水沉积以碎屑流为主(图 5(a)),

碎屑流沉积占到整个深水异地沉积的65%,远比浊流沉积多(浊流占比仅为5%);②碎屑流沉积中,砂质碎屑流沉积多、而泥质碎屑流沉积少见(图5(b));③三角洲前缘滑塌期次多、沉积规模较大,滑塌体钻遇期次和钻遇累计厚度都仅次于碎屑流沉积,而浊流沉积期次较多但单层薄。对研究区深水异地沉积贡献率最高的是碎屑流沉积,其次是滑塌体,滑动和浊流沉积贡献比例各占约5%。其中,碎屑流内部砂质碎屑流最发育。此外,从对深水砂岩储层贡献率看,砂质碎屑流沉积贡献也最大,其次是砂质滑塌体,浊流沉积期多、层薄,贡献非常有限。考虑到砂质滑塌体泥质含量高、物性差,认为砂质碎屑流砂体和滑动砂体是研究区深水沉积中最有利的砂岩储层。

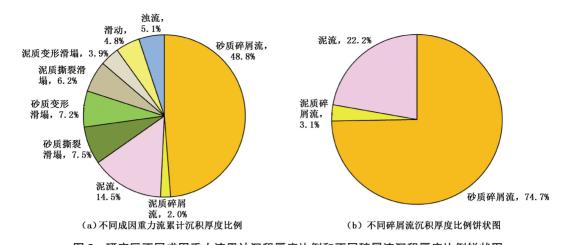


图 5 研究区不同成因重力流累计沉积厚度比例和不同碎屑流沉积厚度比例饼状图 Fig. 5 Pie charts of percentage of different gravity flow in all turbidites and percentage

of different debris flow deposit in all debrites in study area

4 平面分布与发育模式

4.1 平面分布

为了落实不同成因深水沉积的平面分布规律,利用覆盖全区的三维地震资料开展了基于砂组的地震层位和断层解释、属性分析。在各层均方根振幅属性图件的约束下,利用钻遇或钻穿该层的钻测井岩性信息,落实深水沉积体平面展布。最后,利用岩心综合分析结果进行成因标定,完成不同层沉积相图。

振幅类属性对砂岩较为敏感,其高振幅分布区基本与钻井中解释的砂岩发育区对应。从沙三中亚段6砂组的均方根振幅和钻井岩性结果对比结果来看,除了在辛158井-辛斜160井区以外,二者对应关系良好。尤其是在河73-营19井区和新坨743等井处的高均方根振幅分布区与砂岩分布对应关系良好。结合岩心观察和测井曲线形态特征,在该层位中识别出盆地边缘的三角洲、滑动、滑塌、砂质碎屑流、重力流水道、浊流6种沉积单元(图6)。

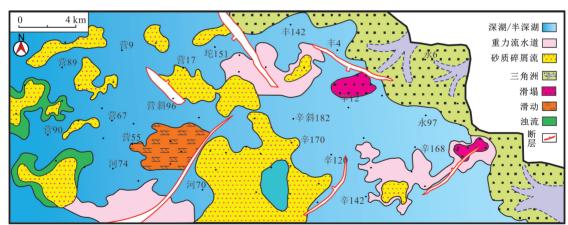


图 6 东辛地区沙三中亚段 6 砂组沉积单元平面分布

Fig. 6 Distribution of sedimentary facies map of sand-group six in Dongxin area

4.2 控制因素

研究区重力流物源来自快速推进的三角洲前缘及部分平原疏松沉积物。在沙河街组三段沉积时期,东营三角洲水平推进速率为 20 m/ka,远高于0.3 m/ka 的垂向加积速率(未考虑压实)^[38]。通过对东营三角洲及其前端沉积地层计算可知,在沙三中亚段沉积期来自东部物源区沉积物总量约 1.59×

 $10^{11} \text{ m}^{3[38]}$

由于三角洲前缘的快速加积或前积,使得大量 沉积物沿斜坡重力下滑形成块体搬运进入深水 区^[39],称之为三角洲过负载作用。此外,断裂的活 动(地震)也是导致三角洲前缘斜坡或大陆坡发生 滑塌形成重力块体搬运和重力流沉积的重要原因, 这在历史上几次有效监测的大规模海底重力流沉积 事件中有详实的记录^[40]。东营凹陷古近系为断裂活动所形成的断陷盆地,沙三中亚段断层活动强烈,这必然对东营三角洲前缘大量碎屑物质在重力作用下搬运进湖泊深水区沉积下来提供重要的触发作用。

在三角洲过负载作用和断裂活动的共同作用下,三角洲前缘斜坡上部砂质沉积物主要发生"断阶滑塌"^[39],以 slide 方式向三角洲前缘斜坡脚搬运,期间部分沉积物发生液化形成滑塌,堆积于前缘斜坡脚及附近,称为一级滑塌体^[39]。此外,进一步液化的沉积物在一级滑塌体前端的斜坡背景下形成高密度流体向前搬运沉积以"泥质沟道—浊积体系"为特征,流体以碎屑流为特征。

滑塌型浊积体系包含滑动、滑塌、碎屑流、浊流的沉积过程。当盆地深水区规模有限,滑塌浊积体系难以发育完整。此外,断层的活动导致局部低势地貌单元的形成,进一步限制了重力流搬运的距离。如果搬运距离非常近,滑动、滑塌可能成为该沉积体系的主体;如果搬运距离较近,可能以滑动、滑塌与碎屑流沉积共存为特征;如果搬运距离较远,则可能

滑动、滑塌少见,而以大量碎屑流沉积和较少的浊流 沉积为特征。东营凹陷沙三中亚段和鄂尔多斯盆地 延长组均可能因此而发育了大规模砂质碎屑流砂 岩。

4.3 发育模式

结合大量岩心、钻测井资料的解释和深水沉积平面分布特征,总结研究区三角洲供给型深水沉积特征(图7):①受控于深水区范围小及断层活动控制的局部地貌特征,研究区重力流沉积搬运距离较小,一般小于20 km,甚至小于10 km;②短距离搬运导致从滑动、滑塌到碎屑流、浊流的演化过程发育不完整,而形成以碎屑流或滑塌为主的深水沉积体系;③三角洲前缘斜坡脚和同生断层下降盘最利于深水沉积,形成规模较大的滑塌和碎屑流沉积;④在断层活动性较弱、地势较稳定的深水斜坡区,重力流搬运较远,可能形成重力流水道,推测重力流水道仅发育"分散状砂体",而缺乏连续性砂岩沉积;⑤在较远距离搬运后的低洼区和断层下降盘控制的较近距离搬运后的低洼区可能形成砂质碎屑流主控的沉积朵叶体、为研究区重力流砂岩油气勘探的重点。

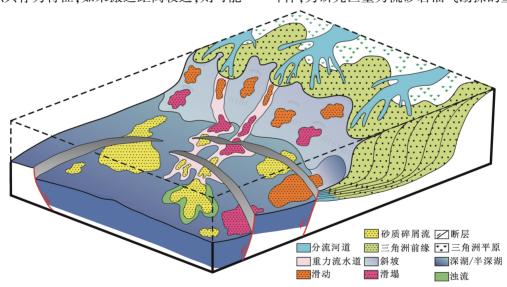


图 7 东营三角洲供给型深水沉积模式

Fig. 7 Depositional model of turbidites system fed by Dongying delta

5 结 论

(1)来自东营三角洲前缘的深水沉积以碎屑流沉积为主,其次是滑塌岩和滑动块体,浊流沉积的贡献有限,仅占深水异地沉积的5%。碎屑流沉积中砂质碎屑流贡献最大,泥流其次,泥质碎屑流对重力流沉积的贡献最小。

(2)有限的搬运距离是研究区碎屑流主控型重

力流沉积体系发育的主要原因。受制于深水沉积区规模和断层活动控制的局部地貌,研究区内深水沉积搬运距离短,从滑动到浊流的演化过程发育不完整,碎屑流向浊流的转化程度低。

(3)受控于高建设性三角洲前缘过负载、断裂活动的频繁触发和河口迁移导致的不连续的物源供给,研究区内单期深水沉积规模有限,导致其储集体的规模小、数量多。地貌上的低洼区易于聚集多期

深水砂质沉积而利于形成规模较大的砂岩储层。上述发现有助于深入理解三角洲供给型重力流沉积体系特征,也为该类深水砂岩储层有效预测和评价提供了地质模型。

参考文献:

- [1] 赵晓明,吴胜和,刘丽. 西非陆坡区深水复合水道沉积构型模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2012,36(6):1-5.

 ZHAO Xiaoming, WU Shenghe, LIU Li. Sedimentary architecture model of deep-water channel complexes in slope area of West Africa[J]. Journal of China Uniersity of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012,36(6): 1-5.
- [2] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents; are they sandy debris flows? [J]. Journal of Sedimentary Research, 1996,66(1):2-10.
- [3] HAUGHTON P, DAVIS C, MCCAFFREY W, et al. Hybrid sediment gravity flow deposits-classification, origin and significance [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009,26(10):1900-1918.
- [4] HAUGHTON P, BARKER S P, MCCAFFREY W D. 'Linked' debrites in sand-rich turbidite systems-origin and significance [J]. Sedimentology, 2003,50(3);459-482.
- [5] ZHANG X, SCHOLZ C A. Turbidite systems of lacustrine rift basins: examples from the Lake Kivu and Lake Albert rifts, East Africa [J]. Sesimentary Geology, 2015,325:177-191.
- [6] TALLING P J, ALLIN J, ARMITAGE D A, et al. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits [J]. Journal of Sedimentary Research, 2015,85(2):153-169.
- [7] YANG T, CAO Y, WANG Y, et al. Status and trends in research on deep-water gravity flow deposits [J]. Acta Geologica Sinica-English Edition, 2015, 89(2):610-631.
- [8] FENG Z, ZHANG S, CROSS T A, et al. Lacustrine turbidite channels and fans in the Mesozoic Songliao Basin, China[J]. Basin Research, 2010,22(1):96-107.
- [9] 冯志强,张顺,解习农,等. 松辽盆地嫩江组大型陆相 坳陷湖盆湖底水道的发现及其石油地质意义[J]. 地质学报, 2006, 80(8):1226-1232.
 FENG Zhiqiang, ZHANG Shun, XIE Xinong, et al. Discovery of a large-scale lacustrine subaqueous channel in the Nenjiang Formation of the Songliao Basin and its implication on petroleum geology[J]. Acta Geologica Sinica, 2006,80(8):1226-1232.
- [10] 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, WAN Yanrong, et al. First discovery of the sandy debris flow from the Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(4):19-21.
- [11] 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 Uniersity of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(1):17-24.
- [12] 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 Benzhong, 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.
- [13] 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]. 地学前缘, 2012,19(1):121-135.

 XIAN Benzhong, 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.
- [14] BAI G, ZHANG S. Depositional patterns and oil/gas accumulation features of Sha-3 member turbidites in Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Science, 2004,1(2):105-110.
- [15] 廖纪佳,朱筱敏,邓秀芹,等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组重力流沉积特征及其模式[J]. 地学前缘, 2013,20(2):29-39.

 LIAO Jijia, ZHU Xiaomin, DENG Xiuqin, et al. Sedimentary characteristics and model of gravity flow in Triassic Yanchang Formation of Longdong area in Ordos
- [16] 侯明才,田景春,陈洪德,等. 东营凹陷牛庄洼陷沙三中段浊积扇特征研究[J]. 成都理工学院学报, 2002,29(5):506-510.
 - HOU Mingcai, TIAN Jingchun, CHEN Hongde, et al. Turbidite fan characters of the intermediate section of member 3 of Shahejie Formation in Niuzhuang depression of Dongying area [J]. Journal of Chengdu Universi-

Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2):29-

[29]

ty of Technology, 2002,29(5):506-510.

thologic Reservoirs, 2010,22(3):16-21.

- [17] 李相博,陈启林,刘化清,等. 鄂尔多斯盆地延长组 3 种沉积物重力流及其含油气性[J]. 岩性油气藏, 2010,22(3):16-21.

 LI Xiangbo, CHEN Qilin, LIU Huaqing, et al. Three types of sediment gravity flows and their petroliferous features of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Li-
- [18] 邹才能,赵政璋,杨华,等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征:以鄂尔多斯盆地为例[J]. 沉积学报, 2009,27(6):1065-1075.

 ZOU Caineng, ZHAO Zhengzhang, YANG Hua, et al. Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in Terrestrial Lacustrine Basin[J]. Acta Sedimentological Sinica, 2009,27(6):1065-1075.
- [19] ZOU C, WANG L, LI Y, et al. Deep-lacustrine transformation of sandy debrites into turbidites, Upper Triassic, Central China [J]. Sedimentary Geology, 2012, 265:143-155.
- [20] 宋广增,王华,孙志鹏,等. 琼东南盆地深水区陵水凹陷古近纪同沉积断裂对层序构成样式的控制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014,38(4):9-18. SONG Guangzeng, WANG Hua, SUN Zhipeng, et al. Paleogene sydepositional fault and its control on sequence architecture of Lingshui sag, deep water area of Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Journal of China Uniersity of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(4):9-18.
- [21] 杨华,邓秀芹. 构造事件对鄂尔多斯盆地延长组深水砂岩沉积的影响[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40 (5):513-520.

 YANG Hua, DENG Xiuqin. Deposition of Yangchang Formation deep-water sandstone under the control of tectonic events, Ordos Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5):513-520.
- [22] 宗国洪,肖焕钦,李常宝,等. 济阳坳陷构造演化及其大地构造意义[J]. 高校地质学报,1999,5(3):275-282.

 ZONG Guohong, XIAO Huanqin, LI Changbao, et al. Evolution of Jiyang depression and its tectonic implications [J]. Geological Journal of China Universities, 1999,5(3):275-282.
- [23] 冯有良,潘元林,郑和荣. 东营凹陷中始新统上部— 上始新统层序地层模式及其石油地质意义[J]. 沉积 学报, 2000,18(3):376-383. FENG Youliang, PAN Yuanlin, ZHENG Herong. Sequence stratigraphic model and its petroleum geological significance of upper part of middle Eocene series and

- Upper Eocene series in Dongying depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000,18(3);376-383.
- [24] MIDDLETON G V, HAMPTON M. Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity waves [C]//STANLEY D J, SWIFT D J P. Marine sediment transport and environmental management. New York: American Geological Institute, 1976:197-218.
- [25] 王裕宜,詹钱登,严璧玉,等. 泥石流体的流变特性与运移特征[M]. 湖南: 湖南科学技术出版社, 2014.
- [26] MIDDLENTON G V. Experiments on density and turibidity currents:

 III deposition of sediment [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1967,4(3):475-505.
- [27] 鲜本忠,朱筱敏,岳大力,等. 沉积学研究热点与进展:第19届国际沉积学大会综述[J]. 古地理学报,2014,16(6):816-826.

 XIAN Benzhong, ZHU Xiaomin, YUE Dali, et al. Current hot topics and advances of sedimentology: a summary from 19th international sedimentological gongress[J].

 Journal of Palaeogeography, 2014,16(6):816-826.
- [28] 鲜本忠,安思奇,施文华. 水下碎屑流沉积;深水沉积研究热点与进展[J]. 地质论评, 2014,60(1):39-51.

 XIAN Benzhong, AN Siqi, SHI Wenhua. Subaqueous debris flow; hotspots and advances of deep-water sedimention[J]. Geological Review, 2014,60(1):39-51.
- 区的泥石流砂质碎屑沉积[J]. 沉积学报, 1987,5 (4):14-24.
 WANG Deping, LIU Shouyi. Debris flow sediments of sandy clastic on the gentle slope area of prodelta in Oligocene, Dongying Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1987,5(4):14-24.

王德坪,刘守义. 东营盆地渐新世早期前三角洲缓坡

- [30] 李云,郑荣才,朱国金,等. 珠江口盆地荔湾 3-1 气田珠江组深水扇沉积相分析[J]. 沉积学报, 2011,29 (4):665-676.

 LI Yun, ZHENG Rongcai, ZHU Guojin, et al. Facies and depositional model of a deepwater fan in the Zhujiang formation, Liwan 3-1 gas field, Baiyun sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011,29(4):665-676.
- [31] SHANMUGAM G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s); deep-water processes and facies models—a critical perspective [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000,17(2):285-342.
- [32] HAMPTON M A. The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1972,42(4):775-793.
- [33] 王德坪. 湖相内成碎屑流的沉积及形成机理[J]. 地

质学报, 1991,9(4):299-316.

WANG Deping. The sedimentation and formation mechanism of lacustrine endogenic debris flow [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1991,9(4):299-316.

- [34] SHULTZ A W. Subaerial debris-flow deposition in the Upper Paleozoic Cutler Formation, Western Colorado [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1984,54(3): 759-772.
- [35] 王苏民.瑞士卢塞恩湖水下泥流的相和搬运特征:泥流转化为浊流的实例[J].湖泊科学,1990,2(1):21-29.
 - WANG Sumin. Facies and transporting characteristics of subaqueous mud flow in Lucerne lake, Switzerland: the case of mud flow transformed into turbidity current [J]. Scientia Limnologica Sinica, 1990,2(1):21-29.
- [36] 中国科学院,水利部成都山地灾害与环境研究所.中国泥石流[M].北京:商务印书馆,2000:391.
- [37] 路智勇. 济阳坳陷东营凹陷陡坡带盐 18 地区重力流 沉积特征与沉积模式[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(3);420-429.
 - LU Zhiyong. Sedimentary characteristics and model of gravity flows in Yan 18 area of the steep slope in Dongy-

- ing sag of Jiyang depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(3):420-429.
- [38] 李趁义. 东营三角洲滑塌浊积岩形成机制与高频基准面旋回控砂模式研究[D]. 北京:中国地质大学, 2005.
 - LI Chenyi. Study on the forming mechanism of the slumped turbidite and the controlling sandbody model of high frequency base-level cycle of Dongying delta[J]. Beijing: China University of Geosciences, 2005.
- [39] 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[J]. 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[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004,22(4): 573-578.
- [40] TALLING P J, ALLIN J, ANMITAGE D A, et al. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits [J]. Journal of Sedimentary Research, 2015,85(2):153-169.

(编辑 徐会永)