

doi:10.3799/dqkx.2017.129

东营凹陷滑塌型重力流沉积分布特征及 三角洲沉积对其影响

张青青^{1,2}, 操应长^{1,2}, 刘可禹^{1,2}, 杨田¹, 王艳忠¹, 贾光华³, 刘鑫金³

1.中国石油大学地球科学与技术学院,山东青岛 266580

2.青岛海洋科学与技术国家实验室海底矿产资源功能实验室,山东青岛 266071

3.中国胜利油田地质科学研究院,山东东营 257000

摘要:三角洲沉积为滑塌型重力流的形成提供了物质来源,它对前端滑塌型重力流的沉积分布特征具有重要影响。以东营凹陷洼陷带沙三中亚段三角洲—前端滑塌型重力流沉积为研究对象,综合利用钻井岩心、三维地震、测录井及分析测试等资料,总结不同类型滑塌型重力流沉积特征、识别标志和分布特征,分析三角洲作为物源对滑塌型重力流的形成、沉积类型、沉积特征和分布特征的影响。研究表明,研究区滑塌型重力流沉积主要发育滑动岩、滑塌岩、碎屑流沉积和浊积岩4种类型,不同类型其沉积构造、粒度特征、地球物理特征差异显著。研究区砂质碎屑流沉积最为发育,滑动滑塌沉积次之,浊流沉积和泥质碎屑流沉积少量发育。不同地区重力流沉积发育程度及常见垂向序列存在差异,博兴南坡与辛133区块重力流类型以砂质碎屑流沉积为主,常见多期次砂质碎屑流沉积相邻或相间垂向组合;牛庄南坡与中央隆起带地区类似,由近及远,重力流类型及垂向序列存在较大差异;营11区块以砂质碎屑流沉积和浊流沉积为主,浊流比例相对其他区块较高;丰14区块单井重力流类型整体较单一,为砂质碎屑流沉积或滑塌沉积。三角洲砂泥百分含量控制了滑塌型重力流的沉积类型和沉积特征;三角洲沉积物粒径控制原始前积角大小,前积角越大,滑塌型重力流越发育,但滑移距离相对越近;三角洲的坡折点控制下,滑动滑塌沉积主要分布在斜坡坡脚和同沉积断层附近,浊流沉积主要分布在深水平原,碎屑流沉积在斜坡坡脚—深水平原均有分布;三角洲高的堆积速率通过减小内摩擦力促使滑塌型重力流的形成,其堆积速率与构造沉降速率的差异对滑塌型重力流沉积的垂向叠置和侧向连续性也具有重要影响。

关键词:滑塌型重力流沉积;沉积特征;分布特征;三角洲物源;沙三中亚段;东营凹陷;石油地质。

中图分类号:P56

文章编号:1000-2383(2017)11-2025-15

收稿日期:2017-05-18

Sedimentary Characteristics of Re-Transported Gravity Flow Deposits and Their Distribution: Influence of Deltaic Sedimentation in the Dongying Sag

Zhang Qingqing^{1,2}, Cao Yingchang^{1,2}, Liu Keyu^{1,2}, Yang Tian¹, Wang Yanzhong¹, Jia Guanghua³, Liu Xinjin³

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

3. Geological Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257000, China

Abstract: Deltaic sedimentation provides the material source for the formation of re-transported gravity flow, and it has a significant effect on the sedimentary characteristics and distribution of re-transported gravity flow deposits. The sedimentary characteristics of different types of gravity flow deposits and their distribution in the middle part of the third member of Shahejie Formation of the Dongying sag were investigated using core, granularity, seismic and well logging data. The influence of deltaic sedimentation on the re-transported gravity flow deposits was studied. It has been shown that four types of gravity flow deposits were developed in Es₃^z in the Dongying sag, including slide and slump deposits, debrites, and turbidites. There exist differences among different types of gravity flow deposits in terms of sedimentary structures, grain size characteristics, and geophys-

基金项目:国家重大科技专项(No.2011ZX05009-003);中央高校基本科研业务费专项资金项目(No.14CX06070A)。

作者简介:张青青(1991—),女,博士研究生,主要从事沉积学和层序地层学的研究工作,ORCID: 0000-0002-6344-4085. E-mail: qqzhupc108@163.com

引用格式:张青青,操应长,刘可禹,等,2017.东营凹陷滑塌型重力流沉积分布特征及三角洲沉积对其影响.地球科学,42(11):2025—2039.

ical responses. In the study area, sandy debrites were best developed, followed sequentially by slide and slump deposits, turbidites, and muddy debrites. There are differences in the abundance of the types and the vertical sequences of different deposits among different locations in the study area. The sedimentary types are mainly composed of sandy debrites with vertical sequences characteristic of amalgamation of sandy debrites being common in the southern Boxing and Xin-133 blocks. There is a big difference among gravity flow deposits and vertical sequences from proximal to distal in the southern of Niuzhuang area and the western central uplift zone. Turbidites are better developed in the Ying-11 block. Sandy debrites and slump deposits are the dominated deposits in the Feng-14 block. The mud content of the delta front deposits appears to have a significant impact on the gravity flow types and their sedimentary characteristics. Deltaic sediments with different grain sizes have different slope angles which is closely related to the formation, types and distribution characteristics of the gravity flow deposits. Under the same conditions, the larger the progradation slope angle is, the better developed the re-transported gravity flow deposits would be, especially for the slide and slump deposits. On the contrary, the sliding distance is shorter. The slide and slump deposits are mainly distributed in the slope break and near the syn-sedimentary faults; turbidites are mainly in the basin floor; while debris flow deposits occur from the slope break to the basin floor. The high accumulation rate contributes to the formation of gravity flows by decreasing the internal friction, and the difference between the accumulation rate and subsidence rate is also of great importance to the vertical superimposed structures and lateral continuity of re-transported gravity flow deposits.

Key words: re-transported gravity flow deposits; sedimentary characteristics; distribution characteristics; delta source; $E_{S_3^z}$; Dongying sag; petroleum geology.

0 引言

深水重力流作为地球上最主要的沉积物搬运机制之一,其能够形成厚度和规模巨大的碎屑砂体沉积,这是当今沉积学界及石油地质学界研究的热点(杨田等,2015a;孙宁亮等,2017).其中,沉积物失稳再搬运作为一种主要的深水重力流成因机制,已经被广泛接受,其形成的重力流沉积在我国湖相鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地东营凹陷、南堡凹陷、苏北盆地高邮凹陷均广泛发育(鲜本忠等,2012;廖纪佳等,潘树新等,2013;2013;刘鑫金等,2016;袁静等,2016;孙宁亮等,2017).三角洲前缘失稳再搬运成因的重力流沉积,其形成经历了“沉积物积累—触发作用—再搬运作用—沉积作用”4个阶段(鄢继华等,2008;杨田等,2015b).三角洲前缘滑塌型重力流形成和发育受到触发机制(鄢继华等,2004;孙宁亮等,2017)、三角洲前缘沉积组成及特征(赵密福等,2001;操应长和刘晖,2007;鄢继华等,2008)、古地形(邱桂强等,2001;赵密福等,2001;操应长和刘晖,2007;鄢继华等,2008;孙宁亮等,2017)、水深及海(湖)平面的变化(操应长和刘晖,2007;鄢继华等,2008)、沉积物供应(鄢继华等,2008;邹才能等,2009;孙宁亮等,2017)、沉积速率(Lastras *et al.*, 2004; Shanmugam, 2006; 鄢继华等, 2008)、构造活动(赵密福等,2001;邹才能等,2009)等诸多因素影响.其中,三角洲作为滑塌型重力流沉积的物源,其物质组成、堆积方式、前积速率等特征对重力流的形

成和沉积分布有重要影响(赵密福等,2001;操应长和刘晖,2007;鄢继华等,2008;刘强虎等,2016;孙宁亮等,2017).然而,不同学者针对三角洲沉积物对滑塌型重力流沉积控制作用的研究虽取得了一定研究成果,但还存在争议(Amy *et al.*, 2006; Baas *et al.*, 2009; Sumner *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2012),特别是三角洲的原始物质组成以及前积角的大小对重力流形成分布的控制作用还多停留在理论分析与物理模拟阶段.Sumner *et al.*(2009)通过开展水槽实验,发现具有固定砂岩含量(10%,体积百分数)和可变泥质含量(0~17%,体积百分数)的快速减速流体可以产生特征差异显著的4种沉积产物.泥砂含量决定了重力流的沉积类型,砂质碎屑流的泥质含量明显低于浊流(杨华等,2015).相同类型的重力流沉积,泥质含量同样影响其沉积特征,不同水含量和粘土含量,形成的碎屑流的粘性不同,随着粘土含量增高和水含量降低,屈服强度呈现增加趋势(Marr *et al.*, 2001).此外,粘土体积浓度对碎屑流的搬运过程也具有重要影响,粘土含量高的高粘结性流体,其底部更易于形成“滑水机制”,从而在较平缓的地区搬运更远的距离(Marr *et al.*, 2001; Istad *et al.*, 2004).Huang *et al.*(2012)通过数值模拟指出,9°~18°是重力流发育的最佳角度范围,在该角度范围内,沉积物失稳是由于地形斜坡坡度单一作用形成; Booth *et al.*(1993)指出海底滑塌发育角度主要集中在3°~4°.整体上,针对上述问题的沉积实例研究还鲜有报道.

东营凹陷沙河街组沙三段沉积时期,三角洲及其前端重力流沉积发育。近年来,随着深水沉积理论的丰富和发展(Shanmugam, 2000, 2006),部分学者针对该地区滑塌型重力流沉积特征及分布模式开展了深入研究,指出三角洲前缘沉积物失稳再搬运过程中发育多种沉积类型,如三角洲前缘斜坡脚、同生断层下降盘及深水低洼区控制了重力流的沉积(陈秀艳等, 2010; 刘鑫金等, 2016; 鲜本忠等, 2016)。上述研究多聚焦重力流沉积砂体自身特征和局部地区,针对三角洲沉积对其前端滑塌型重力流影响的研究相对不足,而三角洲物源供给对滑塌型重力流形成和展布以及“源—汇复合体系”的研究具有重要意义(黄银涛等, 2016)。因此,本文以东营凹陷洼陷带沙三中亚段三角洲—前端滑塌型重力流整体沉积为例,分析三角洲前缘滑塌型重力流的沉积特征及识别标志、发育规模及分布特征,在此基础上,针对三角洲沉积物对滑塌型重力流的控制作用进行分析探讨,明确三角洲沉积对滑塌型重力流形成和沉积分布特征的影响,以期对陆相湖盆三角洲前缘重力流相关研究及勘探提供一定借鉴。

1 地质背景

东营凹陷位于济阳坳陷东南部,西部与林樊家凸起、高青凸起相邻,北靠陈家庄—滨县凸起,东接青坨子凸起,南部与鲁西隆起及广饶凸起呈超覆接触,东西长约 90 km、南北宽约 65 km,总面积约 5 700 km²,是一个典型的北东向展布、北断南超的开阔不对称型箕状断陷湖盆(张永刚等, 2006)。平面上可以划分为北部陡坡带、中央隆起带、南部缓坡带及利津洼陷、民丰洼陷、牛庄洼陷、博兴洼陷 7 个二级构造单元。东营凹陷裂陷中期的沙河街组三段和二段沉积时期,发育了多个三角洲沉积体系(邱桂强等, 2001)。沙三中亚段沉积时期,东营凹陷构造运动强烈,盆地沉降速率大,形成大面积的半深湖—深湖沉积环境,且气候湿润、雨量充沛,碎屑物质供应充足(钟建华等, 2015)。三角洲向盆地中心快速推进,在重力、地震等触发作用下,三角洲前缘沉积物失稳再搬运,在斜坡及盆地平原上形成滑塌型重力流沉积。本次研究以东营凹陷洼陷带为主,重点区块包括牛庄南坡、辛 133 区块、丰 14 区块、营 11 区块、中央隆起带西坡、博兴南坡(图 1)。

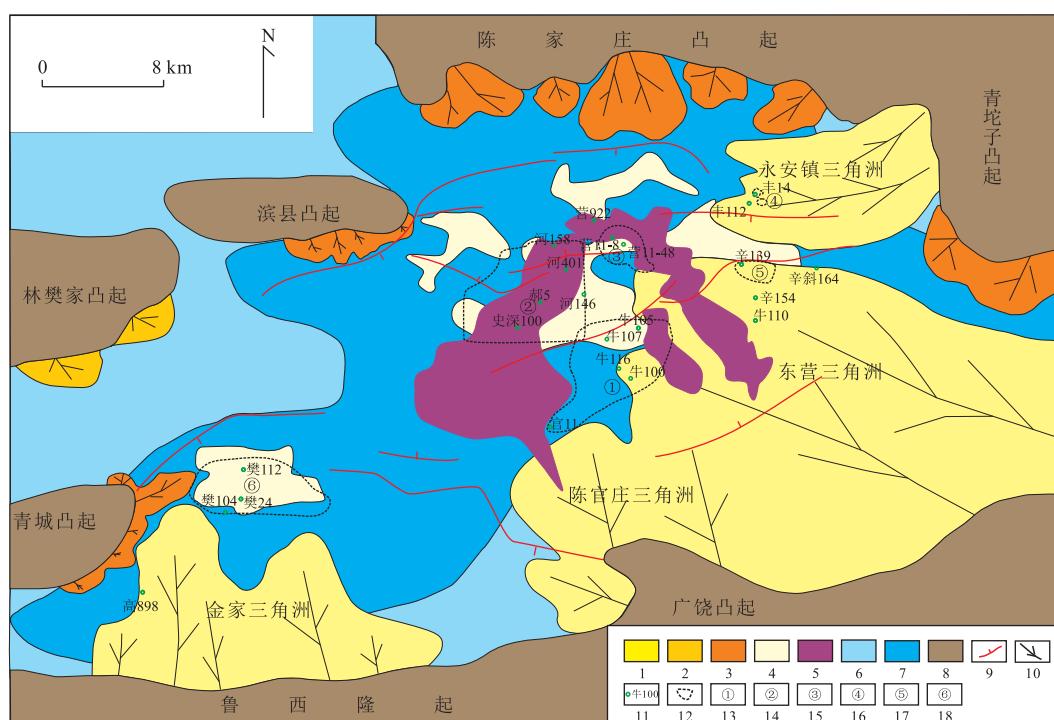


图 1 东营凹陷沙三中亚段沉积相平面分布及研究区块分布

Fig.1 Distribution of sedimentary facies of Es_3^z and the study areas in Dongying sag

1.三角洲;2.扇三角洲;3.近岸水下扇;4.滑塌型重力流;5.洪水型重力流;6.滨浅湖;7.深湖半深湖;8.周围构造;9.断层;10.分流河道;11.岩心观察井号;12.研究区块范围;13.牛庄南坡;14.中央隆起带西坡;15.营 11 区块;16.丰 14 区块;17.辛 133 区块;18.博兴南坡;研究区块由各个地区沉积相图及砂体展布图等共同确定;据 Yang et al.(2016)修改

2 沉积类型及特征

深水环境下滑塌型重力流的重力驱动搬运过程可划分为滑动滑塌、碎屑流及浊流,其中滑动滑塌沉积是滑塌型重力流的重要伴生沉积类型,在滑塌型重力流形成、搬运和沉积过程中不可或缺,因此文中暂将它与滑塌型重力流一并讨论(袁静等,2016;操应长等,2017)。研究区滑塌型重力流沉积主要发育滑动岩、滑塌岩、碎屑流沉积和浊积岩 4 种类型。

2.1 滑动岩

滑动是指处于半固结状态的沉积物块体在一定作用机制下沿平直滑动面以连续或不连续块体(刚性固体)形式做平移剪切移动的过程,因此内部基本不发生形变,在力学性质上主要为弹性形变,呈整体块状固结沉积(Shanmugam, 2013)。研究区滑动岩

岩性以细砂岩为主,典型的沉积构造有:(1)滑动岩与泥岩呈突变接触;(2)滑动岩与泥岩接触部位可见同沉积滑动面,同沉积滑动面可与砂岩呈一定角度接触,泥岩内部可伴生出现部分砂质注入体(图 2a);(3)在砂岩内部可见平行层理等部分原始构造(图 2b),反映砂体再搬运距离近,内部基本不发生形变的特征。

2.2 滑塌岩

滑塌是指斜坡带沉积物在自身重力或一定作用机制下沿上凹滑动面以连续或不连续块体(刚性固体)形式移动,经历旋转变形内部发生明显形变的运动过程,在力学性质上主要为弹性—塑性形变,呈整体块状固结沉积(Shanmugam, 2013)。研究区滑塌岩以粉细砂岩和泥质粉砂岩为主,内部同沉积变形构造发育,典型沉积构造有:(1)砂岩内部炭质层或

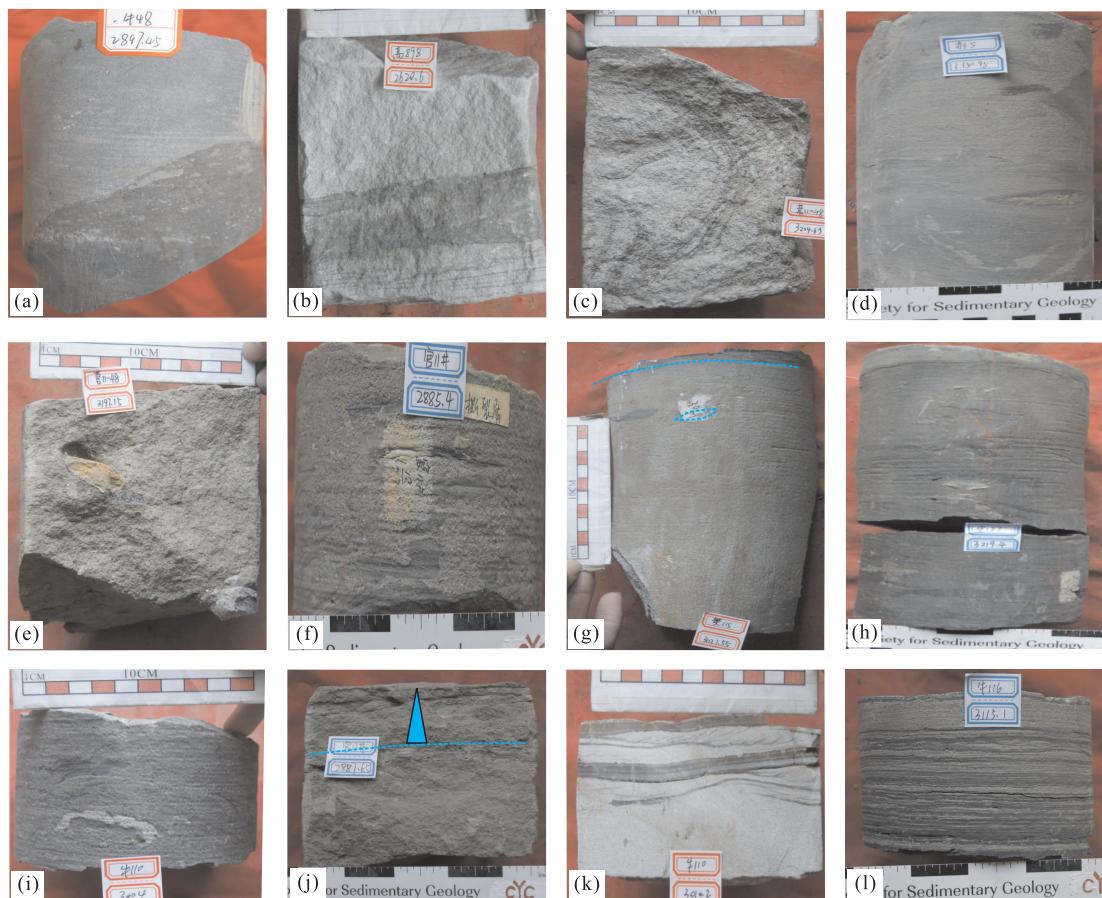


图 2 东营凹陷沙三中亚段三角洲前缘滑塌型重力流典型沉积构造

Fig.2 Typical sedimentary structures of gravity flow deposits in the delta front of Es_3^z in the Dongying sag

a. 牛 48, 2 897.45 m 同沉积滑动面, 可见砂质注入体;b. 高 898, 2 620.60 m 炭质层显平行层理;c. 营 11-48, 3 234.63 m 块状砂岩内炭质层揉皱变形;d. 郝 5, 3 150.95 m 砂泥混杂, 可见棕黄色泥砾;e. 营 11-48, 3 197.15 m 灰色和土黄色漂浮泥砾;f. 官 11, 2 885.40 m 块状砂岩内深灰色泥岩撕裂屑杂乱分布;g. 樊 115, 3 021.55 m 下部为块状砂岩, 含漂浮碎屑, 顶部为薄炭质层显平行层理;h. 史 127, 3 219.40 m 泥质粉砂岩内层状排列灰黑色泥岩撕裂屑发育;i. 牛 110, 3 004.00 m 泥质粉砂岩内含砂质团块和深灰色泥岩撕裂屑;j. 官 11 井, 2 887.65 m 正粒序, 冲刷面可见;k. 牛 110 井, 3 010.20 m ACE 不完整的鲍马序列;l. 牛 116, 3 115.10 m 砂泥薄互层, 多个 AE 序列

泥质条带强烈揉皱变形,与未变形层叠置(图 2c);(2)砂泥混杂,内部可含少量泥砾或泥岩撕裂屑(图 2d);(3)含少量或不含砂质条带的泥质粉砂岩发生强烈变形;(4)高角度断层发育。此外,在砂泥接触处或泥岩中还常伴随发育液化脉、砂球等变形构造,整体上反映了斜坡沉积物在重力或其他作用下失稳再搬运过程中整体发生形变的过程。滑塌岩粒度概率曲线以多段式和上拱弧形式为主,含有少量的两段式,粒度分析 C-M 图反映滑塌岩同时具有重力流和牵引流的特征。

2.3 碎屑流沉积

碎屑流是一种具塑性流变性质的呈块体搬运的沉积物重力流,沉积物呈整体冻结沉积(Shanmugam, 2013)。根据基质含量和支撑机制的不同,碎屑流又可以分为砂质碎屑流和泥质碎屑流。

砂质碎屑流是一种以砂质为主,基质含量较低(可低至 0.5%)具塑性流变特征的碎屑流,其支撑机制包括分散压力、基质强度和浮力(Shanmugam, 1996)。研究区砂质碎屑流沉积以细砂岩为主,以厚层块状砂岩和含碎屑砂岩为典型代表,砂质碎屑流沉积典型沉积构造为:(1)呈厚层块状,与上、下岩层呈突变接触,反映块状冻结特征;(2)含漂浮泥砾,磨圆整体较好,多在相序的中部或顶部出现(图 2e、2g),反映碎屑流具有一定的流体强度和整体固结的沉降方式(高红灿等,2012);(3)泥岩撕裂屑十分发育,颜色以深灰色、灰黑色为主(图 2f、2h、2i),反映

主要来源于前三角洲或盆地平原泥质沉积物的混杂成因。其可呈水平或无序排列(图 2f),前者砂岩的基质含量一般相对较高,泥岩撕裂屑大多呈长条状,两端具撕裂茬,多平行于层面排列,与剪切力增强和作层状流动相对应;后者主要是由于砂岩与泥岩抗剪强度上存在的显著差异,砂质沉积物成为限制泥质碎屑变形的条件,因此泥质在剪切力作用下产生不规则变形(王德坪,1991;杨田等,2015a);(4)部分砂质碎屑流沉积顶部可见薄层微弱平行层理(图 2g),反映了在搬运过程中砂质碎屑流向浊流转化的特征(李存磊等,2012)。砂质碎屑流沉积粒度概率曲线以上拱弧形式和两段式为主,高斜两段式、一跳一悬夹过渡式等粒度概率曲线也较常见,也可见一段式、多段式等,这反映了砂质碎屑流沉积与三角洲前缘水下分流河道、河口坝沉积的粒度特征具有一定的相似性,但又存在差异,或者再搬运后“冻结式”沉积的特征,分选性差。C-M 图反映砂质碎屑流砂体兼具重力流和牵引流的特征。

泥质碎屑流是具有较高基质含量,可混杂有少量砂质团块具塑性流变特征的碎屑流,沉积物主要由基质强度支撑。研究区泥质碎屑流沉积主要为泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,主要特征为内部碎屑较发育,因而有别于正常泥岩(袁静等,2016),泥质碎屑流沉积典型沉积构造为:(1)泥质粉砂岩内泥岩撕裂屑较发育,泥岩撕裂屑主要为深灰色、灰黑色,两端多拉长变细,呈层状排列(图 2h),反映层流的流动

沉积类型		体积分数	流态	力学、流变特征	搬运方式及状态	支撑机制	沉降机制	主要特征及识别标志			
								岩性	沉积构造	粒度	测井相
滑动岩		100%	—	弹性形变	块体搬运,颗粒或团块呈完整的集合体整体搬运	—	—	以砂岩为主同沉积滑动面、内部保留原始沉积构造	—	以箱型为主	厚度较薄,内部呈空白反射
滑塌岩			—	弹性-塑性形变		—	—	砂岩可夹杂泥质或炭质层,或泥质粉砂岩	以多段式和上拱弧形为主,含少量的两段式,C-M图反映滑塌岩同时具有重力流和牵引流的特征	因母岩岩性差异,可呈齿化箱形、齿化漏斗形等,甚至接近基线呈线形,齿化强烈	呈楔形或透镜状,内部具有杂乱反射结构或蠕虫状反射结构
碎屑流沉积	泥质碎屑流沉积	25%~100%	层流	塑性形变,宾汉流体	完整的集合体整体搬运	基质强度	整体冻结沉积	粉砂质泥岩或泥质粉砂岩	内部含砂质团块、泥岩撕裂屑或泥砾发育	—	接近基线呈线形
	砂质碎屑流沉积							中细砂岩,可含碎屑	以呈厚层块状或内部泥质碎屑发育为典型特征	以两段式和上拱弧形为主,高斜两段式、一跳一悬夹过渡式等也较常见,C-M图反映同时具有重力流和牵引流的特征	以箱形为主,漏斗形也较发育,多呈齿化,也可见漏斗形-箱形等复合形态
浊积岩		1%~23%	紊流	黏性流,牛顿流体	流体搬运,单颗粒呈悬浮状态	湍流	悬浮沉降	中细砂-泥岩	以正粒序、砂泥薄互层和不完整的韵律序列发育为典型特征	粒度概率曲线以宽缓上拱式为主,悬浮总体占优势,C-M图基本与基线平行,反映浊积岩具有重力流的特征	指形或接近基线,齿化强烈
										呈席状,内部近空白反射	

图 3 东营凹陷沙三中亚段重力流类型、流体性质及识别标志

特征;(2)泥质粉砂岩或粉砂质泥岩内含砂质团块和棕红色泥砾或灰黑色泥岩撕裂屑(图 2i),砂质团块多呈不规则形态,是由于砂质团块中泥质含量较高在流动过程中具有一定塑性导致(廖纪佳等,2013);(3)泥质粉砂岩内或粉砂质泥岩内含漂浮状泥砾,以棕红色为主,反映泥质碎屑流整体冻结沉积特征。

2.4 浊积岩

浊流是一种具牛顿流变性质和以流体扰动为主要支撑机制的沉积物重力流,不具有任何屈服强度,在流体能量不断降低、流速减小的条件下通过颗粒的逐级沉降的方式沉积,因此多具有正粒序结构(高红灿等,2012).研究区浊积岩岩性以粉细砂岩为主,在牛庄西南和中央隆起带地区可见一些含砾砂岩。浊积岩以正粒序和砂泥岩薄互层发育为代表,典型沉积构造为:(1)底部呈突变接触,顶部呈渐变接触,反映浊流在沉降过程中能量逐渐减弱的特征;(2)正粒序层理发育,冲刷面可见(图 2j),可发育槽模、沟模等侵蚀构造,反映了浊流具有一定的侵蚀能力和按粒级大小沉降的特征;(3)递变层理上部伴随发育

平行层理或沙纹层理,构成不完整鲍马序列(图 2k);(4)砂泥岩薄互层,常构成多个旋回(图 2l),反映了流体能量整体相对较弱的特征,可伴随发育液化构造和重荷模构造。浊积岩粒度概率曲线以宽缓上拱式为主,悬浮总体占优势,分选差。粒度分析 C-M 图基本与基线平行,反映浊积岩具有重力流的特征。

3 发育规模及分布特征

结合重力流沉积特征,基于不同取心井的分布位置,利用 34 口取心井、736.98 m 岩心观察,对不同地区不同类型重力流的单层厚度及发育程度进行统计(图 4),明确不同地区滑塌型重力流沉积的垂向序列(图 5)。

砂质碎屑流沉积和滑塌岩单期沉积厚度变化较大,前者变化范围为 0.1~6.5 m,平均值为 0.81 m,后者变化范围为 0.1~4.5 m,平均值为 0.77 m;滑动岩单层厚度范围为 0.6~2.0 m,平均值为 1.33 m;泥质碎屑流沉积单层厚度范围为 0.1~0.6 m,平均值

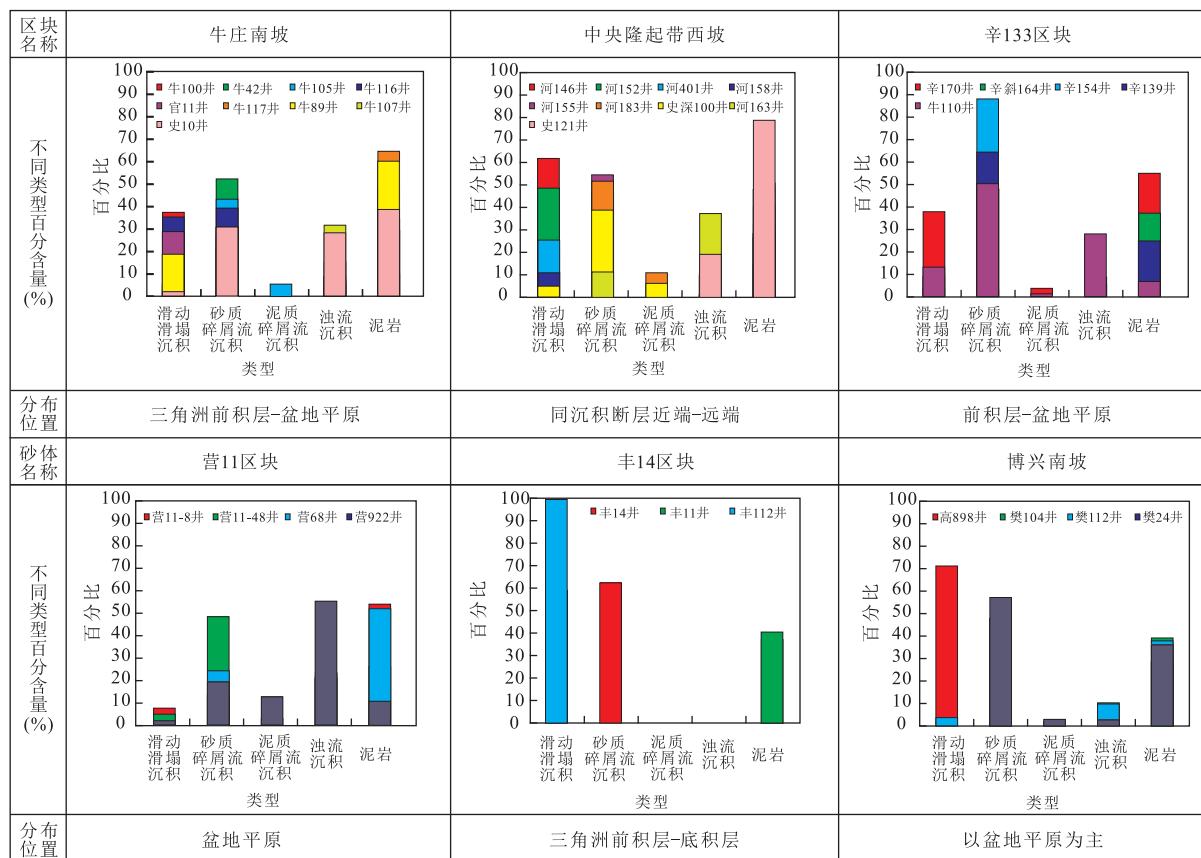


图 4 东营凹陷不同地区典型井取心段不同重力流类型及泥岩百分含量直方图

Fig.4 Percentage histograms of gravity flow deposits and mudstones of cored sections of typical wells in different parts in the Dongying sag

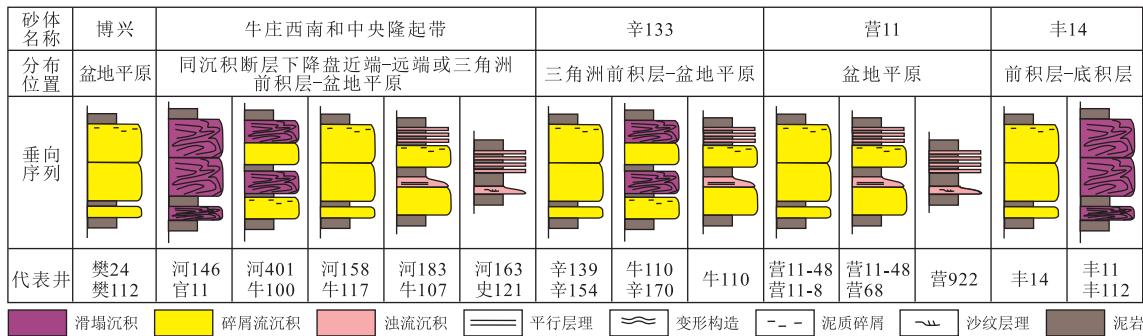


图 5 东营凹陷不同地区滑塌型重力流沉积常见垂向序列

Fig.5 Characteristic vertical sequences of gravity flow deposits in different parts of the study area in the Dongying sag

表 1 东营凹陷沙三中亚段不同地区不同类型重力流百分含量对比

Table 1 Percentage comparison of different types of gravity flow deposits in Es₃ in different parts of the Dongying sag

不同类型含量	滑动滑塌沉积物百分比(%)	砂质碎屑流沉积物百分比(%)	泥质碎屑流沉积物百分比(%)	浊积岩百分比(%)
东营凹陷	23.97	56.02	2.38	17.64
牛庄南坡	19.23	55.19	1.09	24.49
辛133区块	17.55	66.44	1.40	14.60
营11区块	7.22	45.48	5.06	42.24
丰14区块	84.84	15.16	0.00	0.00
中央隆起带西坡	37.39	46.60	2.46	13.55
博兴南坡	6.64	80.49	3.68	9.24

注:东营凹陷沙三中用于统计的取心井为 34 口,共计 736.98 m,其中牛庄南坡取心井为 9 口,共计 176.92 m;辛133砂体取心井为 5 口,共计 86.52 m;营11砂体取心井为 4 口,共计 81.75 m;丰14砂体取心井为 3 口,共计 39.41 m;中央隆起带西坡为 9 口,共计 196.19 m;博兴南坡取心井为 4 口,共计 156.19 m.

为 0.33 m;浊积岩的厚度范围为 0.01~0.50 m,一般小于 15 cm。尽管各个地区不同类型重力流百分比有差异,但总体上砂质碎屑流沉积最为发育,然后依次是滑动滑塌沉积、浊流沉积、泥质碎屑流沉积(表 1)。垂向序列研究表明,研究区主要发育多期砂质碎屑流沉积彼此相邻或相间沉积、砂质碎屑流沉积与滑塌岩相邻或相间沉积、砂质碎屑流沉积与浊流沉积相邻或相间沉积等垂向序列。

不同研究区滑塌成因重力流发育程度及常见垂向序列存在差异。其中,牛庄西南地区重力流取心井段在三角洲前积层—盆地平原内均有分布,重力流沉积类型复杂,整体以砂质碎屑流沉积为主,其次是滑动滑塌沉积(图 4、图 6 和表 1)。在同一期次内(Z4),随着距离三角洲距离增大,浊流沉积比例增加,远端浊流沉积百分含量可占重力流百分含量的 48.5%(牛 107 井),且处于三角洲不同位置的取心井段的垂向序列具有很大差异(图 6)。总体上,牛庄地区可见多种垂向序列,以多期砂质碎屑流沉积相邻或相间沉积和砂质碎屑流沉积与浊流沉积相邻或相间沉积更为常见(图 5、图 6);中央隆起带西坡取心井段在同沉积断层下降盘近端—远端均有分布,

整体上滑动滑塌沉积和砂质碎屑流沉积较发育(图 4、表 1)。垂向组合以多期次滑塌沉积彼此相邻或相间沉积、滑塌沉积与碎屑流沉积彼此相邻或相间沉积、多期砂质碎屑流沉积彼此相邻或相间沉积更为常见(图 5);辛133区块整体以砂质碎屑流沉积为主,单井砂质碎屑流沉积含量可达 90.9%(包含泥岩为 88.23%),受同沉积断层影响,部分单井滑动滑塌沉积十分发育(图 4、表 1),常见多期砂质碎屑流沉积相邻或相间沉积垂向组合(图 5);营11砂体取心井段主要位于盆地平原,以砂质碎屑流沉积和浊流沉积为主,与其他区块相比,重力流砂体中浊流沉积比例明显增高(表 1),营922井取心井段浊流沉积比例可达 62%(包含泥岩为 55.33%)(图 4),常见多期砂质碎屑流沉积相邻或相间沉积垂向组合(图 5);丰14砂体距离永安镇三角洲较近,观察取心井段位于三角洲前积层—底积层内,重力流类型整体较单一(图 4、表 1),其中丰112井及丰11井整体表现出滑塌沉积特征(图 4),常见多期滑塌沉积彼此相邻、多期砂质碎屑流沉积彼此相邻的垂向组合

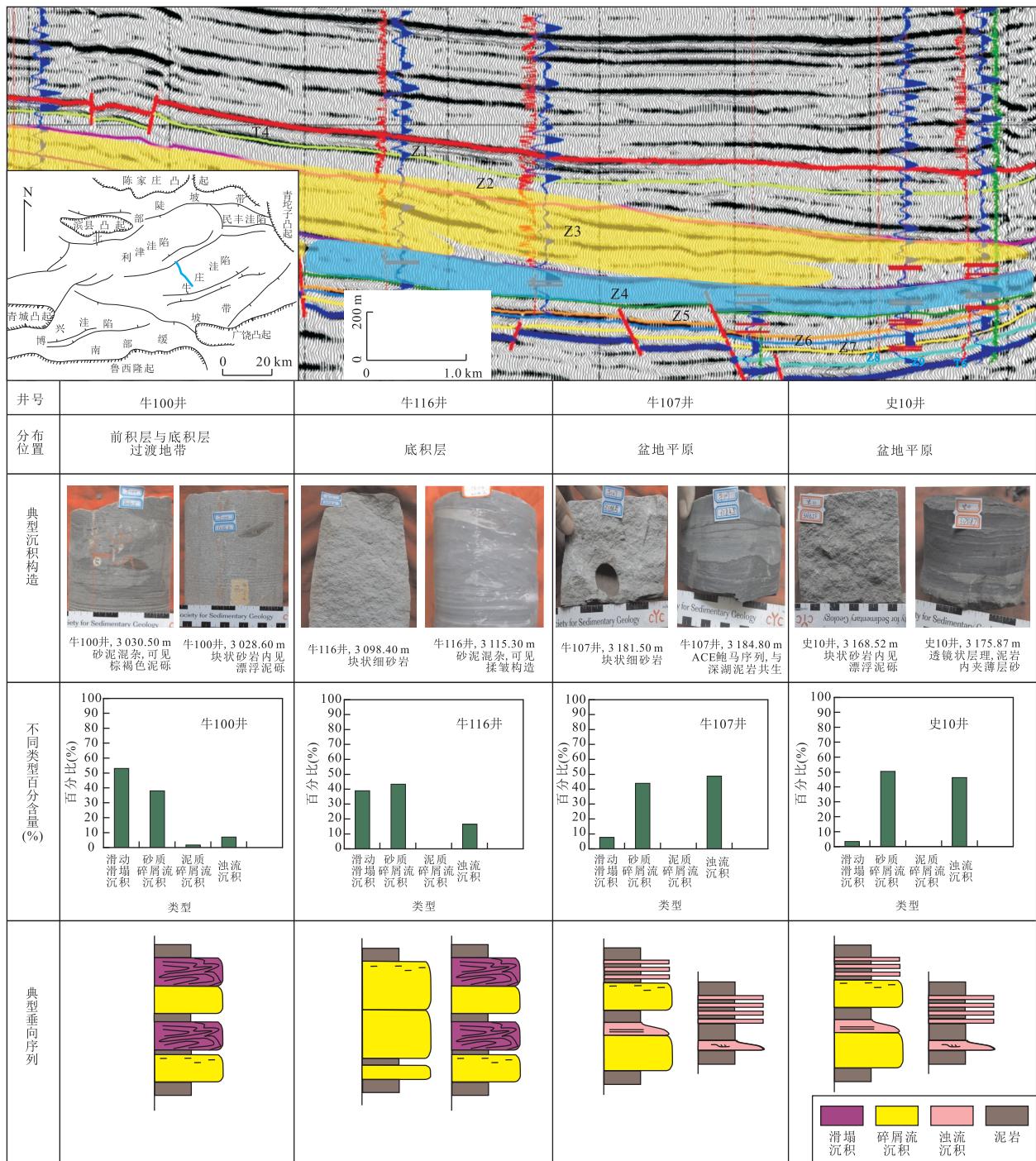


图 6 牛庄地区东南向过牛 100—史 10 剖面及各取心井沉积类型及典型垂向序列分析

Fig.6 Cross section through well Niu-100 and well Shi-10 in the southeast direction and sedimentary types and typical vertical sequences of each cored wells in the Niuzhuang area

(图 5);博兴地区取心井段主要位于盆地平原,整体以砂质碎屑流沉积为主(图 4、表 1),含量达 75%以上(包含泥岩为 47.8% 以上),位于前积层内的高 898 井沉积类型以滑动沉积为主(图 4),常见多期砂质碎屑流沉积彼此相邻或相间沉积垂向组合(图 5)。

4 三角洲沉积对滑塌型重力流的影响

三角洲沉积物为滑塌型重力流的形成提供了物质来源。三角洲—前端滑塌型重力流体系作为一个特殊的源—汇系统,三角洲的物质组成、前积角大小、坡折结构、堆积过程等,对其前端滑塌型重力流

的形成和沉积分布特征具有重要影响(赵密福等,2001;操应长和刘晖,2007;鄢继华等,2008;刘强虎等,2016;孙宁亮等,2017)。

4.1 三角洲物质组成的影响

三角洲的沉积物组成对滑塌型重力流的沉积类型和沉积特征具有重要影响。博兴地区辫状河三角洲前缘以粉砂岩、细砂岩为主,发育有水下分流河道及河口坝微相,二者相互叠置可达几百米,而其中的泥质夹层则相对较薄,因此砂岩百分含量相对较高(宋建勇,2005)。东营三角洲沙三中沉积时期各个地区砂、泥比例存在变化,牛庄洼陷平均砂岩百分含量为26.0%,陈官庄—王家岗地区的平均砂岩百分含量为38.1%,而八面河地区平均砂岩百分含量为21%(李趁义,2005)。博兴三角洲前端滑塌型重力流沉积以砂质碎屑流沉积为主,且多呈厚层块状,内部无其他明显构造,而东营三角洲前端泥质滑塌沉积占较大比重,尤其是在同沉积断层下降盘附近(如中央隆起带西坡),常见含少量或不含砂质条带的泥质粉砂岩发生强烈变形、砂泥混杂或者互层的砂泥岩强烈揉皱变形、砂岩液化脉等同沉积变形构造,且碎屑流沉积中泥质碎屑整体较博兴地区发育(图7),因此三角洲沉积的沙地比是决定其前端滑塌重力流沉积类型的主要控制因素。此外,营11砂体整体距离东营三角洲较远,但砂质碎屑流沉积仍十分发育,笔者推测为东营三角洲含有较高的泥质含量,转化形成的碎屑流易于形成滑水机制,搬运较远的距离

而不发生流体的稀释转化(Mohrig *et al.*, 1998; Ilstad *et al.*, 2004)。

4.2 三角洲原始前积角的影响

Duncan and Wright(2005)指出斜坡保持稳定的条件是剪切强度不小于剪切力,因此造成斜坡发生滑塌的原因是砂体剪切强度的降低及/或受剪切力的增大(Duncan and Wright, 2005)。对于三角洲前缘砂体,沿斜坡方向向下的重力分量作为主要动力,因此相同条件下,斜坡坡度越陡,沉积物越容易发生失稳再搬运。原始沉积物前缘斜坡的坡度及休止角大小与粒径密切相关(操应长和刘晖,2007; Cheng and Zhao, 2017)。对东营三角洲和陈官庄三角洲—重力流体系几何要素量化统计可以看出(图8),沙三中沉积中期原始前积角较大,连井剖面显示滑塌型重力流沉积在沙三中中期更为发育(图9),表明了前积角大小对重力流发育具有重要的控制作用。当前积角较大时,东营三角洲和陈官庄三角洲前缘重力流均表现出滑移距离较近的特征,而东营三角洲与陈官庄三角洲相比,其各个期次的原始前积角均较小,滑移距离整体相对较远(图8),反映了前积角大小对滑塌型重力流分布具有一定影响。此外,前积角大小对滑塌型重力流的沉积类型也具有重要影响。操应长和刘晖(2007)指出当沉积地形坡度大于20°时,一般与断层作用有关。研究区尤其是中央隆起带地区,同沉积断层活动剧烈,靠近下降盘地区滑动滑塌沉积十分发育,推测为角度较陡,再搬运砂体运动速

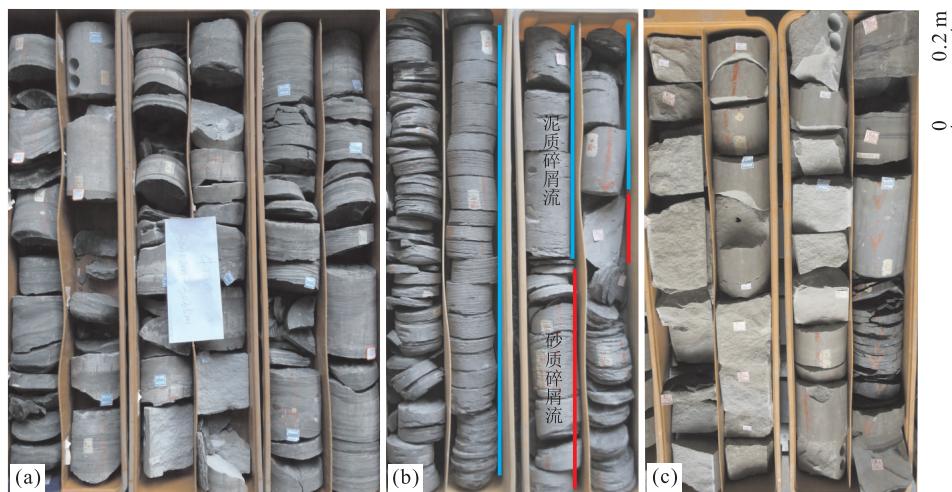


图 7 东营和博兴三角洲前端典型取心井滑塌型重力流沉积特征

Fig.7 Sedimentary characteristics of gravity flow deposits of typical cored wells from the Dongying delta front and the Boxing delta front

a. 牛 100 井, 3 030.20~3 035.00 m 泥质滑塌整体发育;b. 营 11-8 井, 3 052.50~3 056.28 m 泥质碎屑流和砂质碎屑流中泥质碎屑发育;c. 樊 24 井, 2 919.46~2 922.96 m 块状厚层砂岩整体发育

不同三角洲 期次	东营三角洲									陈官庄三角洲						
	中1	中2	中3	中4	中5	中6	中7	中8	中9	中1	中2	中3	中4	中5+ 中6	中7+ 中8+中9	
三角洲前缘 砂体沉积坡 度*	1.3	1.4	2.5	3.6	2.8	2.2	1.5	0.8	1.3	三角洲前缘 砂体沉积坡 度*	2.3	2.4	4.5	4.6	2.8	2.2
主推进方向 重力流距前 缘一般距离	5.29	7.55	9.45	9.52	7.29	8.97	15.33	19.57	24.34	主推进方向 重力流距前 缘一般距离*	10.54	10.21	7.11	6.79	8.44	8.21
三角洲前缘 砂体沉积坡 度**	—	—	2.16	2.67	3.20	—	—	—	—	三角洲前缘 砂体沉积坡 度**	—	—	—	—	—	
主推进方向 重力流距前 缘一般距离**	—	—	10.11	14.00	8.89	—	—	—	—	主推进方向 重力流距前 缘一般距离**	—	—	—	—	—	
三角洲前缘 砂体沉积坡 度***	1.71	2.2	2.66	3.72	2.39	—	—	—	—	三角洲前缘 砂体沉积坡 度***	1.5	2.6	3.69	4.12	2.9	—

图 8 东营三角洲和陈官庄三角洲—重力流体系各期次几何要素量化统计

Fig.8 Quantitative comparison of the geometric elements of different stages between the Dongying delta-gravity flow system and the Chenguanzhuang delta-gravity flow system

*.胜利油田地质科学研究院; **.陈世悦等(2014); ***.本文计算; 单位: 度

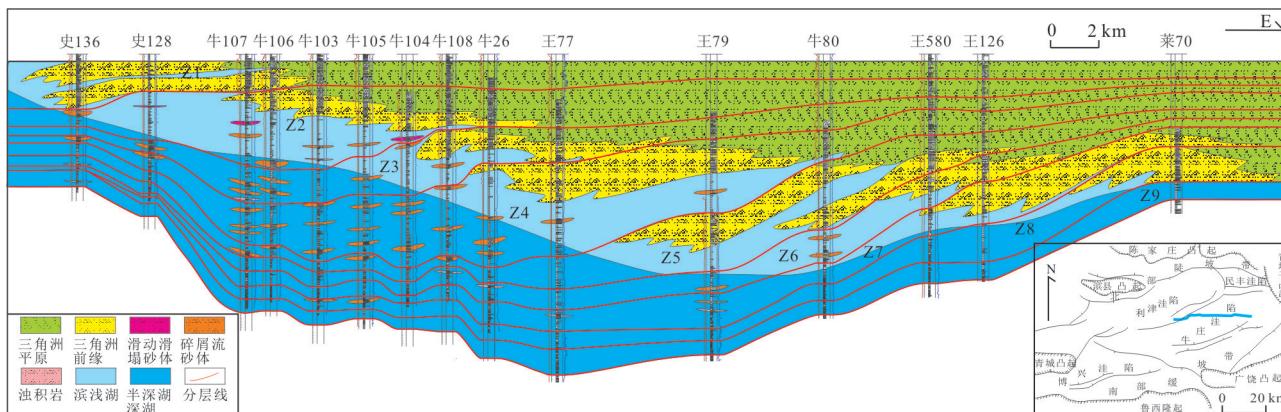


图 9 东营凹陷沙三中东营三角洲过史 136-莱 70 井沉积相连井对比剖面

Fig.9 Sedimentary facies ($E_{S_3}^z$) correlation cross section through well Shi-136 and well Lai -70 of the Dongying delta in the Dongying sag

度快,块体解集作用与环境流体交换作用不充分,便在断层下降盘附近发生沉积,因此沉积类型以滑动滑塌沉积为主,这从一定程度也说明了前积角大小对滑塌型重力流的沉积类型也具有一定影响。

4.3 三角洲地形坡折的影响

再搬运过程中,克服滑动、滑塌和碎屑流抗剪强度的外力主要是砂体自身重力沿底面方向向下的分力,因此随着地形坡度变缓,当重力等不足以克服块体的抗剪强度时重力流将发生卸载沉降。三角洲前缘与前三三角洲之间和前三三角洲与盆地平原之间存在两个转折点,重力流在这两个位置发生大量卸载(操应长和刘晖,2007)。研究区滑动滑塌沉积主要分布在斜坡坡脚附近,尤其在同沉积断层作用下滑动滑塌沉积更为发育,浊流沉积主要分布在盆地平原中,砂质碎屑流沉积在斜坡坡脚、底积层及盆地平原均有分布(图 4,图 6),表明了坡折点对不同类型重力

流的分布具有一定控制作用。其中,发育于斜坡坡脚附近的滑动滑塌沉积以及部分砂质碎屑流沉积可对应于鄂继华等(2007,2008)实验中的前积层和底积层转折点处的主滑塌沉积和底积层上的液化浊积体和次生叠置浊积体(图 10),推测主要与地震作用和沉积断层活动有关,这也与研究工区地质背景相一致。如中央隆起带的河 125 断层其不同位置的生长指数均大于 1,平均为 1.4~1.5,古落差变化较大,可达 1 200 m,平均为 200~400 m(郭洪金,2007),有效地控制了重力流砂体的发育程度和类型,使得在同沉积断层的下降盘滑塌类型相对较发育。

水槽实验表明单次碎屑流沉积形成舌形体,且碎屑流在搬运过程中可以与母体脱离,在滑水机制的作用下可在平坦地区搬运较远的距离(Shanmugam, 2012)。流体在运动过程中逐渐被稀释,当水充分混合到碎屑流中可形成湍流,碎屑流向浊流发生转化(李

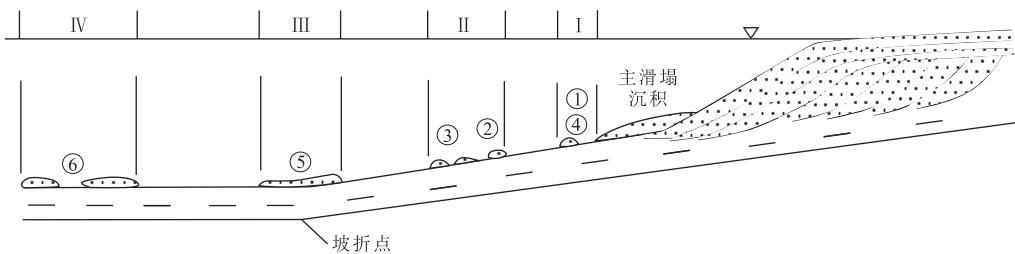


图 10 不同触发机制作用下重力流分布规律

Fig.10 Distribution patterns of re-transported gravity flow deposits originated from different triggering mechanisms

- ①.浪成浊积体;②.强水流成因的深水沟道浊积体;③.振动成因的液化浊积体;④.振动成因的次生叠置浊积体;⑤.强水流成因的舌形发散体;
⑥.振动成因的二级滑塌浊积体;据鄆继华等(2008)

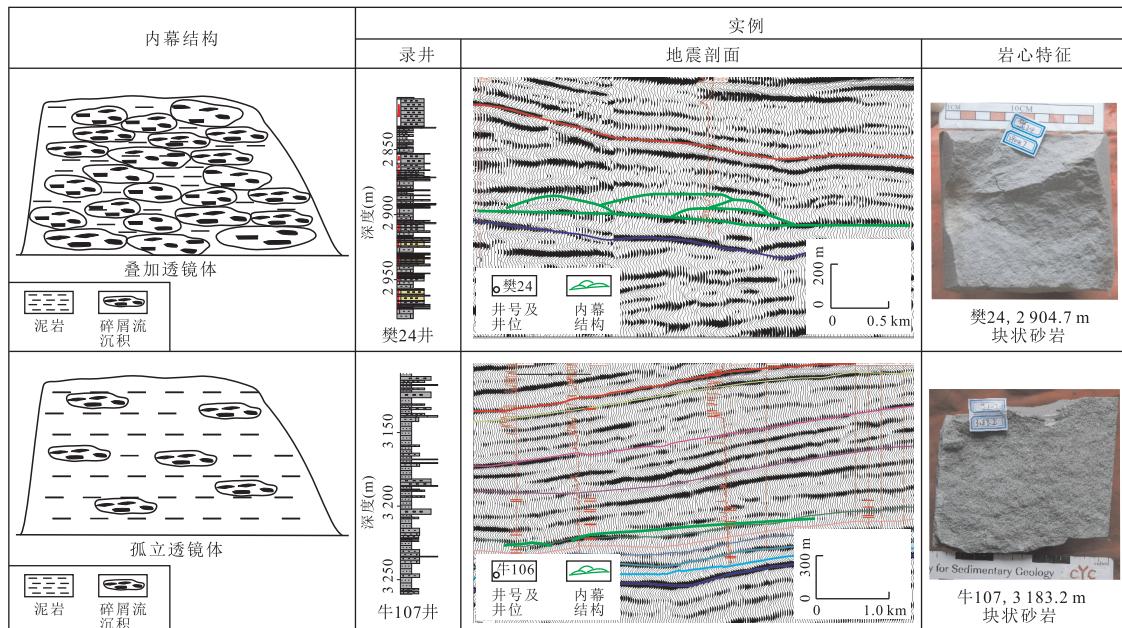


图 11 东营凹陷沙三中亚段博兴地区和牛庄地区砂质碎屑流的内幕结构

Fig.11 Internal structures of $E_{S_3}^z$ sandy debris flow deposits in the Boxing and Niuzhuang areas of the Dongying sag

存磊等,2012;裴羽等,2015).因此,研究区发育于底积层和深水平原转折点处以砂质碎屑流沉积为主的沉积及深水平原处的砂质碎屑流沉积和浊积岩分布,可对应于鄆继华等(2007,2008)实验中三角洲底积层和盆地平原坡折点附近的舌形发散体(图 10 中Ⅲ)及深水洼陷区的二级滑塌浊积体(图 10 中Ⅳ).

4.4 三角洲堆积速率的影响

沙河街组三段沉积时期,东营三角洲水平推进速率为 20 km/ka ,尤其是沙三中时期来自东部物源区的沉积物供应达 $1.59 \times 10^{11} \text{ m}^3$,而同期来自鲁西隆起的沉积物供应也高达 $6.36 \times 10^{10} \text{ m}^3$,充足的沉积物供应和高的三角洲堆积速率主要通过孔隙压力增加引起沉积物内部发生液化,因而降低内摩擦力的大小,促使沉积物发生失稳再搬运,从而诱发了研究区滑塌型重力流的形成,相比较而言牛庄地区更

为发育(李趁义,2005;Shanmugam,2015;鲜本忠等,2016).此外,三角洲堆积速率与构造沉降速率的差异对滑塌型重力流沉积的垂向叠置和侧向连续性也具有重要影响.沙三段沉积时期,博兴洼陷地区三角洲沉积物供应速率与构造沉降速率相当,可容空间基本保持稳定,三角洲砂体逐渐加积(赵密福等,2001).因此,滑塌成因重力流沉积垂向上沉积类型分布稳定,呈现多期次砂质碎屑流沉积叠加的垂向序列,形成厚度较厚的砂体,侧向上连续性较好,在地震剖面上多呈叠加透镜状的形态.而东营三角洲水平推进速率高于构造沉降速率,三角洲前缘快速前积(鲜本忠等,2016),滑塌成因重力流随三角洲推进而推移,垂向上重力流沉积类型递变频繁,侧向分散连续性较差,在地震剖面上多呈相对较孤立的透镜状形态(图 11).

5 结论

(1) 研究区滑塌型重力流沉积主要发育滑动岩、滑塌岩、碎屑流沉积和浊积岩 4 种类型。其中砂质碎屑流沉积最为发育(达 56.02%), 滑动滑塌沉积次之, 浊流沉积和泥质碎屑流沉积少量发育。三角洲前缘沉积物在自身重力或断层等作用下失稳再搬运, 形成了滑塌型重力流, 随着搬运距离的增加, 滑塌型重力流经历了“滑动—滑塌—碎屑流—浊流”的转化。总体上, 辛 133 区块、博兴南坡和丰 14 区块距离三角洲较近, 重力流搬运距离有限, 因此沉积类型以砂质碎屑流沉积为主, 常见多期次砂质碎屑流沉积相邻或相间沉积垂向组合; 牛庄南坡与中央隆起带地区, 重力流搬运距离由近及远均有分布, 因此重力流类型及垂向序列存在较大差异。尤其是相对于其他地区, 在同沉积断层下降盘附近滑塌沉积发育, 常见多期次滑塌沉积彼此相邻或相间沉积垂向组合; 营 11 区块整体距离东营三角洲较远, 重力流经历了相对较长的搬运距离, 其类型以砂质碎屑流沉积和浊流沉积为主, 浊流沉积比例相对其他区块较高。

(2) 研究区三角洲沉积对滑塌型重力流的形成、沉积类型、沉积特征及分布特征均具有重要影响。三角洲砂泥百分含量控制了滑塌型重力流的沉积类型和沉积特征, 三角洲中泥质含量越高, 形成的滑塌型重力流沉积中泥质滑塌沉积及碎屑流沉积中泥质碎屑相对越发育; 三角洲沉积物粒径控制原始前积角大小, 前积角越大, 滑塌型重力流越发育, 但滑移距离相对越近; 三角洲的坡折点控制下, 滑动滑塌沉积主要分布在斜坡坡脚和同沉积断层附近, 浊流沉积主要分布在深水平原, 碎屑流沉积在斜坡坡脚—深水平原均有分布; 三角洲高的堆积速率通过减小内摩擦力, 促使滑塌型重力流的形成, 其堆积速率与构造沉降速率的差异对滑塌型重力流沉积的垂向叠置和侧向连续性也具有重要影响。

References

- Amy, L.A., Talling, P.J., Edmonds, V.O., et al., 2006. An Experimental Investigation of Sand-Mud Suspension Settling Behaviour: Implications for Bimodal Mud Contents of Submarine Flow Deposits. *Sedimentology*, 53(6): 1411–1434. doi: 10.1111/j.1365-3091.2006.00815.x
- Baas, J.H., Best, J.L., Peakall, J., et al., 2009. A Phase Diagram for Turbulent, Transitional, and Laminar Clay Suspension Flows. *Journal of Sedimentary Research*, 79(3–4): 162–183.
- Booth, J.S., O'leary, D.W., Popenoe, P., et al., 1993. US Atlantic Continental Slope Landslides: Their Distribution, General Attributes, and Implications. In: Schwab, W.C., Lee, H.J., Twichell, D.C., eds., *Submarine Landslides: Selected Studies in the US Exclusive Economic Zone*. US Geological Survey Bulletin, U.S.A., 14–22.
- Cao, Y.C., Liu, H., 2007. Discussion on the Relationship of Fluxoturbidite and Depositional Slope of Delta in Lacustrine Basin. *Geological Review*, 53(4): 454–459 (in Chinese with English abstract).
- Cao, Y.C., Wang, S.J., Wang, Y.Z., et al., 2017. Sedimentary Characteristics and Depositional Model of Slumping Deep-Water Gravity Flow Deposits: A Case Study from the Middle Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in Linnan Subsag, Bohai Bay Basin. *Journal of Paleogeography*, 19(3): 419–432 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S.Y., Bi, M.W., Liu, H.M., et al., 2014. Quantitative Prediction Model for the Dongying Delta-Fluxoturbidite Depositional System in the Middle Es₃ Period. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(5): 921–929 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X.Y., Shi, J., Xu, J., 2010. Types and Oil Potential of Gravity Flow Sandbodies in the Middle Es₃ of Dongxin Oilfield, the Bohai Bay Basin. *Oil and Gas Geology*, 31(5): 594–601 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, N., Zhao, K., 2017. Difference between Static and Dynamic Angle of Repose of Uniform Sediment Grains. *International Journal of Sediment Research*, 32: 149–154. doi: 10.1016/j.ijsrc.2016.09.001
- Duncan, J.M., Wright, S.G., 2005. Soil Strength and Slope Stability. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Gao, H.C., Zheng, R.C., Wei, Q.L., et al., 2012. Reviews on Fluid Properties and Sedimentary Characteristics of Debris Flow and Turbidity Currents. *Advances in Earth Science*, 27(8): 815–827 (in Chinese with English abstract).
- Guo, H.J., 2007. Geometry Analysis and the Control of the Fault He 125 on the Sedimentation of Es₃^z in Dongying Sag (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou, 17–19 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X., Dyt, C., Griffiths, C., et al., 2012. Numerical Forward Modelling of “Fluxoturbidite” Flume Experiments Using Sedsim. *Marine and Petroleum Geology*, 35(1): 190–200. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2012.02.012
- Huang, Y.T., Yao, G.Q., Zhou, F.D., 2016. Provenance Analysis and Petroleum Geological Significance of Shallow Marine Gravity Flow Sandstone for Huangliu Formation of Dongfang Area in Yinggehai Basin, the South

- China Sea. *Earth Science*, 41(9): 1526—1538 (in Chinese with English abstract).
- Ilstad, T., Elverhøi, A., Issler, D., et al., 2004. Subaqueous Debris Flow Behaviour and Its Dependence on the Sand/Clay Ratio: A Laboratory Study Using Particle Tracking. *Marine Geology*, 213(1): 415—438. doi: 10.1016/j.margeo.2004.10.017
- Lastras, G., Canals, M., Urgeles, R., et al., 2004. Characterisation of the Recent Big'95 Debris Flow Deposit on the Ebro Margin, Western Mediterranean Sea, after a Variety of Seismic Reflection Data. *Marine Geology*, 213(1—4): 235—255. doi: 10.1016/j.margeo.2004.10.008
- Li, C.L., Ren, W.W., Tang, M.M., 2012. Preliminary Study on Gravity Flow Depositional System Based on Properties Conversion Theory. *Geological Review*, 58(2): 285—296 (in Chinese with English abstract).
- Li, C. Y., 2005. Study on the Forming Mechanism of the Slumped Turbidite and the Controlling Sandbody Model of High Frequency Base-Level Cycle of Dongying Delta (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing, 24—25 (in Chinese with English abstract).
- Liao, J.J., Zhu, X. M., Deng, X. Q., et al., 2013. Sedimentary Characteristics and Model of Gravity Flow in Triassic Yanchang Formation of Longdong Area in Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 29—39 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. H., Zhu, X. M., Li, S. L., et al., 2016. Pre-Palaeogenen Bedrock Distribution and Source-to-Sink System Analysis in the Shaleitian Uplift. *Earth Science*, 41(11): 1935—1949 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. J., Liu, H. M., Song, G. Q., et al., 2016. Sedimentary Characteristics and Distribution Pattern of the Slope-Shifting Fan in the Low-Lying Slope Zone of Dongying Sag. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 23(4): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Marr, J.G., Harff, P.A., Shanmugam, G., et al., 2001. Experiments on Subaqueous Sandy Gravity Flows: The Role of Clay and Water Content in Flow Dynamics and Depositional Structures. *Geological Society of America Bulletin*, 113(11): 1377—1386. doi: 10.1130/0016-7606(2001)113<1377:EOSSGF>2.0.CO;2
- Mohrig, D., Ellis, C., Parker, G., et al., 1998. Hydroplaning of Subaqueous Debris Flows. *Geological Society of America Bulletin*, 110(3): 387—394. doi: 10.1130/0016-7606(1998)110<0387:HOSDF>2.3.CO;2
- Pan, S. X., Zheng, R. C., Wei, P. S., et al., 2013. Deposition Characteristics, Recognition Mark and Form Mechanism of Mass Transport Deposits in Terrestrial Lake Basin. *Lithologic Reservoirs*, 25(2): 9—18 (in Chinese with English abstract).
- Pei, Y., He, Y. B., Li, H., et al., 2015. Discussion about Relationship between High-Density Turbidity Current and Sandy Debris Flow. *Geological Review*, 61(6): 1281—1292 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, G. Q., Wang, J. F., Zhang, X., et al., 2001. Preliminary Study on Stratigraphic Architecture of Middle-E₃ Dongying Delta and Its Significance to Hydrocarbon Exploration. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(4): 569—574 (in Chinese with English abstract).
- Shanmugam, G., 1996. High-Density Turbidity Currents: Are They Sandy Debris Flows? *Journal of Sedimentary Research*, 66: 2—10.
- Shanmugam, G., 2000. 50 Years of the Turbidite Paradigm (1950s—1999s); Deep-Water Processes and Facies Models—A Critical Perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17: 174—231. doi: 10.1016/S0264-8172(99)00011-2
- Shanmugam, G., 2006. Deep-Water Processes and Facies Models: Implications for Sandstone Petroleum Reservoirs. Elsevier, Amsterdam.
- Shanmugam, G., 2012. New Perspectives on Deep-Water Sandstones: Origin, Recognition, Initiation, and Reservoir Quality. Elsevier, Amsterdam.
- Shanmugam, G., 2013. New Perspectives on Deep-Water Sandstones: Implications. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 294—301. doi: 10.1016/S1876-3804(13)60038-5
- Shanmugam, G., 2015. The Landslide Problem. *Journal of Palaeogeography*, 4(2): 109—166. doi: 10.3724/SP.J.1261.2015.00071
- Song, J. Y., 2005. High-Resolution Sequence Stratigraphy and Reservoir Strata Prediction in the Boxing Sub-depression (Dissertation). Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 47—48 (in Chinese with English abstract).
- Sumner, E. J., Talling, P. J., Amy, L. A., 2009. Deposits of Flows Transitional between Turbidity Current and Debris Flow. *Geology*, 37(11): 991—994. doi: 10.1130/G30059A.1
- Sun, N. L., Zhong, J. H., Wang, S. B., et al., 2017. Sedimentary Characteristics and Petroleum Geologic Significance of Deep-Water Gravity Flow of the Triassic Yanchang Formation in Southern Ordos Basin. *Journal of Paleogeography*, 19(2): 299—314 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D. P., 1991. The Sedimentation and Formation Mechanism of Lacustrine Endogenic Debris Flow. *Acta Geologica Sinica*, 65(4): 299—316 (in Chinese with English abstract).
- Xian, B. Z., Wan, J. F., Jiang, Z. X., et al., 2012. 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. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 121—135 (in Chinese with English abstract).
- Xian, B. Z., Wang, L., Liu, J. P., et al., 2016. Sedimentary Characteristics and Model of Delta-Fed Turbidites in Eocene Eastern Dongying Depression. *Journal of China University of Petroleum*, 40(5): 10—21 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. H., Chen, S. Y., Jiang, Z. X., et al., 2007. Simulating Experiment on Genesis of Seismo-Turbidites in Rift Lacustrine Basin. *Journal of Palaeogeography*, 9(3): 277—282 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. H., Chen, S. Y., Jiang, Z. X., et al., 2008. Genesis and Distribution Regularity of the Turbidite Bodies in the Delta Front. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(1): 16—19 (in Chinese with English abstract).
- Yan, J. H., Chen, S. Y., Song, G. Q., et al., 2004. Preliminary Study on the Formation of Fluxoturbidite in Front of Delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(4): 573—578 (in Chinese with English abstract).
- Yang, H., Niu, X. B., Luo, S. S., et al., 2015. Research of Simulated Experiment on Gravity Flow Deposits of Tight Sand Bodies of Chang 7 Formation in Longdong Area, Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 22(3): 322—332 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Cao, Y. C., Wang, Y. Z., et al., 2015a. Types, Sedimentary Characteristics and Genetic Mechanisms of Deep-Water Gravity Flows: A Case Study of the Middle Submember in Member 3 of Shahejie Formation in Jiayang Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 36(9): 1048—1059 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Cao, Y. C., Wang, Y. Z., et al., 2015b. Sediment Dynamics Process and Sedimentary Characteristics of Hyperpycnal Flows. *Geological Review*, 61(1): 23—33 (in Chinese with English abstract).
- Yang, T., Cao, Y. C., Wang, Y. Z., et al., 2016. The Coupling of Dynamics and Permeability in the Hydrocarbon Accumulation Period Controls the Oil-Bearing Potential of Low Permeability Reservoirs: A Case Study of the Low Permeability Turbidite Reservoirs in the Middle Part of the Third Member of Shahejie Formation in Dongying Sag. *Petroleum Science*, 13(2): 204—224.
- Yuan, J., Liang, H. Y., Liang, B., et al., 2016. Sedimentary Characteristics and Development Model of Lacustrine Gravity Flow: A Case Study of Dainan Formation in Deep Sag Belt of Gaoyou Depression, Northern Jiangsu Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 37(3): 348—359 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. G., Xu, W. P., Wang, G. L., et al., 2006. Hydrocarbon Accumulation Assemblages of Continental Rift Basin in Eastern China. Petroleum Industry Press, Beijing, 127—170 (in Chinese).
- Zhao, M. F., Xin, Q. L., Liu, Z. R., et al., 2001. Distribution Rules of Fluxoturbidite in the Linnan Sag of the Huimin Depression and Their Controlling Factors. *Petroleum Geology & Experiment*, 23(3): 267—271 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, J. H., Li, Y., Shao, Z. F., et al., 2015. The Ultr-Water Lake of Middle Es₃ Formation during Paleogene in Dongying Sag, NE China. *Geological Journal of China Universities*, 21(2): 320—327 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., Zhao, Z. Z., Yang, H., et al., 2009. Genetic Mechanism and Distribution of Sandy Debris Flows in Terrestrial Lacustrine Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1066—1075 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 操应长, 刘晖, 2007. 湖盆三角洲沉积坡度带特征及其与滑塌冲积岩分布关系的初步探讨. 地质论评, 53(4): 454—459.
- 操应长, 王思佳, 王艳忠, 等, 2017. 滑塌型深水重力流沉积特征及沉积模式: 以渤海湾盆地临南洼陷古近系沙三中亚段为例. 古地理学报, 19(3): 419—432.
- 陈世悦, 毕明威, 刘惠民, 等, 2014. 沙三中亚期东营三角洲—滑塌冲积体系预测模型研究. 沉积学报, 32(5): 921—929.
- 陈秀艳, 师晶, 徐杰, 2010. 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. 石油与天然气地质, 31(5): 594—601.
- 高红灿, 郑荣才, 魏钦廉, 等, 2012. 碎屑流与浊流的流体性质及沉积特征研究进展. 地球科学进展, 27(8): 815—827.
- 郭洪金, 2007. 东营凹陷河 125 断层的几何学再造及其对沙三中砂体沉积的控制作用(博士学位论文). 杭州: 浙江大学, 17—19.
- 黄银涛, 姚光庆, 周锋德, 2016. 莺歌海盆地黄流组浅海重力流砂体物源分析及油气地质意义. 地球科学, 41(9): 1526—1538.
- 李存磊, 任伟伟, 唐明明, 2012. 流体性质转换机制在重力流沉积体系分析中应用初探. 地质论评, 58(2): 285—296.
- 李趁义, 2005. 东营三角洲滑塌冲积岩形成机制与高频基准面旋回砂模式研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学, 24—25.
- 廖纪佳, 朱筱敏, 邓秀芹, 等, 2013. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组重力流沉积特征及其模式. 地学前缘, 20(2):

29—39.

刘强虎,朱筱敏,李顺利,等,2016.沙垒田凸起前古近系基岩分布及源—汇过程.地球科学,41(11):1935—1949.

刘鑫金,刘惠民,宋国奇,等,2016.东营凹陷洼陷斜坡带坡移扇沉积特征及展布模式.油气地质与采收率,23(4):1—10.

潘树新,郑荣才,卫平生,等,2013.陆相湖盆块体搬运体的沉积特征、识别标志与形成机制.岩性油气藏,25(2):9—18.

裴羽,何幼斌,李华,等,2015.高密度浊流和砂质碎屑流关系的探讨.地质论评,61(6):1281—1292.

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(4):569—574.

宋建勇,2005.博兴洼陷高分辨率层序地层研究与储层预测(博士学位论文).青岛:中国科学院,47—48.

孙宁亮,钟建华,王书宝,等,2017.鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组深水重力流沉积特征及其石油地质意义.古地理学报,19(2):299—314.

王德坪,1991.湖相内成碎屑流的沉积及形成机理.地质学报,65(4):299—316.

鲜本忠,万锦峰,姜在兴,等,2012.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.地学前缘,19(1):121—135.

鲜本忠,王璐,刘建平,等,2016.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.中国石油大学学报(自然科学版),40(5):10—21.

鄢继华,陈世悦,姜在兴,等,2007.断陷湖盆震浊积岩成因模拟实验.古地理学报,9(3):277—282.

鄢继华,陈世悦,姜在兴,等,2008.三角洲前缘浊积体成因及分布规律研究.石油实验地质,30(1):16—19.

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.

杨华,牛小兵,罗顺社,等,2015.鄂尔多斯盆地陇东地区长7段致密砂体重力流沉积模拟实验研究.地学前缘,22(3):322—332.

杨田,操应长,王艳忠,等,2015a.深水重力流类型、沉积特征及成因机制——以济阳坳陷沙河街组三段中亚段为例.石油学报,36(9):1048—1059.

杨田,操应长,王艳忠,等,2015b.异重流沉积动力学过程及沉积特征.地质论评,61(1):23—33.

袁静,梁绘媛,梁兵,等,2016.湖相重力流沉积特征及发育模式——以苏北盆地高邮凹陷深凹带戴南组为例.石油学报,37(3):348—359.

张永刚,许卫平,王国力,等,2006.中国东部陆相断陷盆地油气成藏组合体.北京:石油工业出版社,127—170.

赵密福,信荃麟,刘泽容,等,2001.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,23(3):267—271.

钟建华,李勇,邵珠福,等,2015.东营凹陷古近纪沙三中期超深水湖泊的研究.高校地质学报,21(2):320—327.

邹才能,赵政璋,杨华,等,2009.陆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.沉积学报,27(6):1065—1075.