

文章编号:1673-5005(2022)01-0013-10 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2022.01.002

东营凹陷东坡古近系沙三中亚段异重流沉积特征与沉积模式

刘海宁^{1,2}, 韩宏伟², 操应长¹, 曲志鹏², 张云银², 杨田³

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化胜利油田分公司物探研究院, 山东东营 257022; 3. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川成都 610059)

摘要:通过三维地震、测录井资料、岩心分析、粒度分析、薄片分析和水槽模拟试验,对东营凹陷东坡古近系沙三中亚段异重流沉积的沉积特征、分布规律和沉积模式进行研究。结果表明:研究区异重流沉积以泥砾岩、细砂岩和粉砂岩沉积为主,杂基平均质量分数为12.6%,成分成熟度较低,粒度概率累积曲线以反映重力流沉积的上拱弧形、宽缓上拱型和低斜两段式为主;侵蚀充填构造、平行层理、逆正粒序层理、沙纹层理、波状层理、块状层理和炭质碎屑层是异重流沉积典型的沉积构造;沉积近端王59井以泥质碎屑流和底床载荷主导的高密度异重流沉积垂向叠置为主要特征,沉积远端牛876井以悬浮载荷主导的低密度异重流沉积和漂浮沉积垂向叠置为主要特征;平面分布呈条带状,在沉积近端以碎屑流沉积为主,伴随搬运距离增加,碎屑流转化为异重流;湖盆异重流搬运演化过程经历流体潜入区、流体稳定厚度区和流体膨胀区,流体潜入区是决定侵蚀作用程度和范围的主要控制区域,流体稳定厚度区是底床载荷主导异重流沉积范围,流体膨胀区则是悬浮载荷和漂浮沉积物沉积区;断陷湖盆异重流沉积水道化特征不明显,沉积物粒度从粗到细均有发育,砂体的分布受古地貌控制可呈现条带状或扇状分布特征。

关键词:异重流;重力流;沉积特征;分布特征;沉积模式;断陷湖盆

中图分类号:TE 121.3 **文献标志码:**A

引用格式:刘海宁,韩宏伟,操应长,等. 东营凹陷东坡古近系沙三中亚段异重流沉积特征与沉积模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(1): 13-22.

LIU Haining, HAN Hongwei, CAO Yingchang, et al. Sedimentary characteristics and depositional model of hyperpycnites in the middle of the third member of Paleogene Shahejie Formation in the east slope of Dongying Sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(1): 13-22.

Sedimentary characteristics and depositional model of hyperpycnites in the middle of the third member of Paleogene Shahejie Formation in the east slope of Dongying Sag

LIU Haining^{1,2}, HAN Hongwei², CAO Yingchang¹, QU Zhipeng², ZHANG Yunyin², YANG Tian³

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. Institute of Geophysical Exploration, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257022, China;
3. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: The sedimentary characteristics, distribution pattern, and depositional model of hyperpycnites in the middle of the third member of the Paleogene Shahejie Formation in the east slope of Dongying Sag were studied, by combining three-dimensional seismic, logging data, core analysis, grain size analysis, thin section analysis and flume simulation experiments analysis. The results show that hyperpycnites in the study area are dominated by mud conglomerate, fine-grained sandstone and

收稿日期:2021-09-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41802127,42072126);青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室开放基金项目(MQGNLM201816);2019年中国石油科技创新基金研究项目(2019D-5007-0106);中国石化科技攻关项目(P20060-1)

第一作者:刘海宁(1986-),男,副研究员,博士研究生,研究方向为油气勘探地震地质。E-mail:liuhaining632_slyt@sinopec.com。

通信作者:杨田(1989-),男,研究员,博士,研究方向为储层地质学。E-mail:yangtian19@cdut.edu.cn。

siltstone. The average content of matrix is 12.6%, and the maturity of the composition is low. The probability curve of particle size exhibit an upward arc with wide gentle shape, and has a low-inclination two-stage type, which are indication of gravity flow deposition. In the research area, typical sedimentary structures of hyperpycnites include erosion and filling structures, parallel bedding, inverse then normal grading sequence, ripple, wavy bedding, massive bedding and carbonaceous clastic layers. The Wang 59 well in proximal is mainly characterized by the vertical stacking of muddy debris flow deposits and high-density bed-load dominated hyperpycnal flow deposits. The Niu 876 well in distal is mainly characterized by the vertical stacking of low-density suspended load dominated hyperpycnal flow deposits and lofting deposits. There is an elongated shape in the plane distribution of debris flow deposits in proximal. With the increase of the transport distance, the debris flow is transformed into hyperpycnal flow. The transfer and evolution processes of hyperpycnal flow in the lacustrine basin undergo a fluid plunging zone, a fluid stabilization thickness zone and a fluid expansion zone. The fluid plunging zone determines the extent and scope of erosion, and the fluid stabilization thickness zone is the bed-load dominated hyperpycnal flow deposition zone, the fluid expansion zone is the suspended load dominated hyperpycnal flow and lofting sediment deposition zone. Channels are not obvious in hyperpycnites in lacustrine rift basins, and the grain size of the sediments is developed from coarse to fine. The distribution of sand bodies is controlled by the paleomorphology and can present a strip or fan-like distribution.

Keywords: hyperpycnal flow; gravity flow; sedimentary characteristics; distribution pattern; depositional model; lacustrine rift basin

深水重力流沉积形成的粗碎屑沉积和细粒沉积已成为中国陆相湖盆常规和非常规油气勘探的重要对象^[1-3],明确湖盆深水重力流砂体成因及其沉积分布规律对指导油气勘探开发意义重大^[4-6]。近年来在深水重力流流体类型、成因机制和沉积模式的研究中涌现诸多新认识^[3,7-8],湖盆深水重力流沉积研究也不乏亮点,特别是湖盆异重流沉积广泛发育的认识^[9-10],为拓展深水重力流砂体分布范围的认识提供理论支撑。湖盆异重流主要是指河流洪水期携带大量沉积物颗粒、从河口直接沿盆地底部向盆地中心流动的高密度流体^[11-12]。湖盆异重流沉积过程由于受洪水能量先增强后减弱的演化过程控制,形成明显有别于经典浊流鲍马序列沉积的逆-正粒序沉积组合,是异重流沉积最为典型的识别标志^[13-15]。由于受洪水持续侧向补给,一方面异重流沉积中发育大量的陆源炭质碎屑;另一方面持续的推移作用使得上攀层理、波状层理等牵引构造发育^[5,9,16]。同时受洪水持续性补给控制,异重流能够持续数天或数周保持流体的稳定状态^[17],因此能形成厚度和规模较大的储集砂体及伴生的细粒沉积^[5,18-19]。异重流的形成不依赖于早期浅水三角洲沉积物的堆积,因此在三角洲不发育的区域,同样可形成大量的异重流沉积;同时异重流经历从河口至深水区的整个搬运演化过程,在部分深水沉积环境不发育的相对浅水湖盆,同样可形成规模可观的异重流沉积。东营凹陷东坡古近系沙中亚段底部发育一套典型的条带状深水重力流沉积砂体,前期研究认为其为典型的异重

流沉积产物^[10]。以该砂体为研究对象,通过三维地震、测井录井、岩心和分析测试等资料综合分析,进一步明确断陷湖盆异重流沉积特征及分布规律,以期为断陷湖盆异重流沉积的勘探开发提供理论指导。

1 地质概况

东营凹陷北以陈南断层为界,与陈家庄—滨县凸起相邻,南以齐河—广饶断裂为界,与广饶凸起及鲁西隆起呈超覆接触,向西以平南断层和高青断层为界,与青城凸起及林樊家凸起相邻,向东与青坨子凸起相邻,总体上为北断南超、北陡南缓的复式半地堑伸展盆地^[20](图1)。盆地东西长约为90 km,南北宽约为65 km,面积大约为5 700 km²,区域上可以划分为北部陡坡带、中央断裂背斜带(中央隆起带)、民丰洼陷、利津洼陷、牛庄洼陷、博兴洼陷、南部缓坡带7个二级构造单元^[20]。研究区位于东营凹陷东部,横跨牛庄洼陷、中央隆起带和利津洼陷3个二级构造单元(图1)。古近系沙河街组沙三中亚段沉积早期,构造运动强烈,湖盆深陷扩张;同时气候湿润,降雨充沛,水体深度和范围不断增加^[8]。此时东营三角洲分布范围较小,东南部物源提供的碎屑沉积物在充沛降雨的作用下,可能以异重流的形式潜入到湖底沿北西方向深水区搬运,在盆地的东部形成沿王59井至牛876井延伸到营67井附近呈条带状展布,以砂泥互层沉积为主要表现形式的深水砂体(图1)。

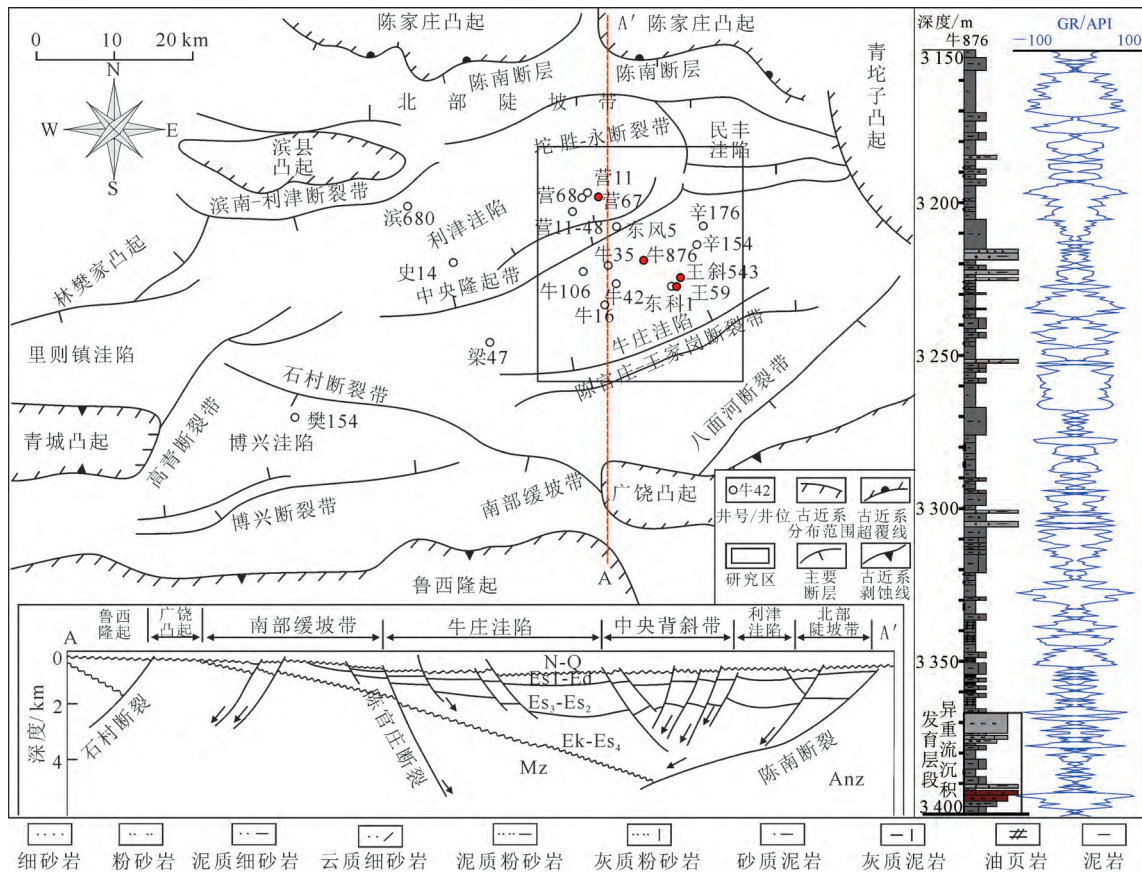


图 1 研究区位置与沉积序列

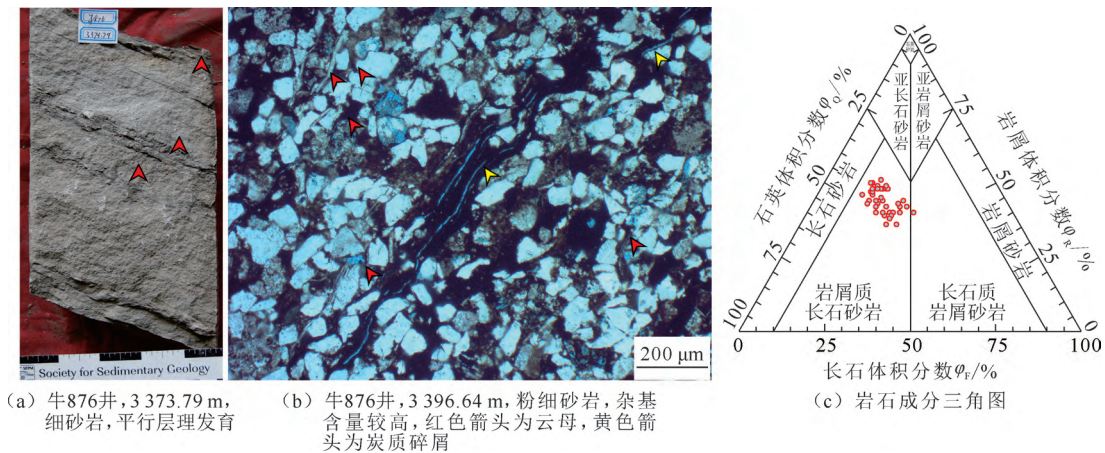
Fig. 1 Location of research area and sedimentary sequence

2 沉积特征

2.1 岩石学特征

东营凹陷东坡深水重力流沉积整体以中薄层砂岩与深灰色泥岩互层为典型沉积组构(图 1),砂岩以细砂岩和粉砂岩为主(图 2(a)),包含部分含砾

砂岩、中粗砂岩及泥质砂岩;碎屑颗粒以次棱角状到次圆状为主,分选较好,反映为相对长距离搬运沉积产物(图 2(b))。根据物质组成,砂岩主要为岩屑质长石砂岩(图 2(c)),填隙物质量分数较高,以杂基为主,杂基质量分数分布在 1%~48%,平均质量分数为 12.6%,相对高的杂基质量分数指示相对近



(a) 牛876井,3 373.79 m, 细砂岩,平行层理发育

(b) 牛876井,3 396.64 m,粉细砂岩,杂基含量较高,红色箭头为云母,黄色箭头为炭质碎屑

(c) 岩石成分三角图

图 2 东营凹陷东坡沙三中亚段异重流沉积岩性与岩石成分三角图

Fig. 2 Lithology and triangular diagram of rock composition of hyperpycnite in the middle of the third member of Shahejie Formation

源重力流沉积砂泥混杂的特征。成分成熟度较低,为0.5806~1.0408,平均为0.7968,相对较低的成分成熟度与高杂基质量分数相对应,进一步指示重力流沉积砂体砂泥混杂的特征。

2.2 沉积物粒度特征

粒度概率累积曲线以反映重力流沉积的上拱弧形、宽缓上拱型和低斜两段式3种类型为主(图3)。上拱弧形粒度概率曲线主要为薄层泥质砂岩或相序组合顶部砂岩,以高悬浮次总体体积分数为典型特征,如王59井3301.76 m处样品中悬浮组分体积分数高达30%,跳跃组分粒度分布较集中,为相对中低强度黏性碎屑流沉积产物。低斜两段式粒度概率曲线以斜率差别迥异的跳跃次总体和悬浮次总体发育为特征,如王斜543井3178.45 m处样品中跳跃与悬浮次总体交切点在2.8 ϕ 位置;悬浮次总体分选极差,体积分数接近9%;跳跃次总体体积分数高达90%,分选较差,低斜两段式粒度概率曲线反映底负载发育长距离搬运分选较好的高密度浊流沉积动力环境。因此粒度概率曲线分布指示碎屑流与浊流同时发育的沉积动力环境。

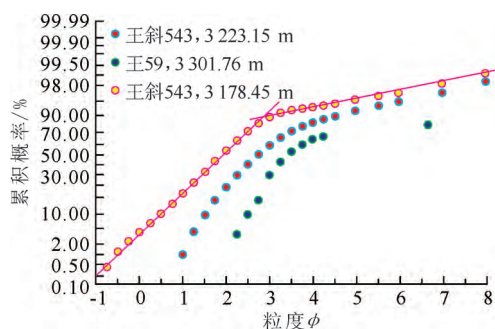


图3 异重流沉积粒度概率曲线

Fig. 3 Grain size probability plot of hyperpycnite

2.3 沉积构造

2.3.1 侵蚀充填构造

侵蚀充填构造以浅水和深水沉积砂泥混杂(图4(a))、砂质沉积物侵蚀泥质基底(图4(b))和相对粗粒沉积物侵蚀相对细粒沉积物(图4(c))为典型特征。浅水和深水沉积砂泥混杂主要表现为不同粒径沉积物的混合,指示流体整体塑性流变特征(图4(a))。土黄色和浅灰色泥砾指示洪水期河流携带的粒度较粗的沉积物在湖盆边界潜入后对下伏泥质基底强烈的侵蚀作用,随着侵蚀作用的不断增强,流体中泥质质量分数不断增加,整体转化为泥质碎屑流沉积^[4]。随着流体侵蚀能力的减弱,其携带的砾质沉积不断卸载,砂质沉积物向前搬运进一步侵蚀深灰色泥质基底,形成典型的底部侵蚀接触和杂乱

分布的泥岩撕裂屑(图4(b))。此外不同能量的洪水携带的沉积物颗粒之间存在一定差异,洪水能量较强的时候携带的相对粗粒沉积物会进一步侵蚀下部相对较细的沉积物^[13],导致粗粒沉积物与下伏细粒沉积物之间同样表现为显著的侵蚀接触关系(图4(c))。

2.3.2 层理构造

研究区异重流沉积典型的层理构造包含平行层理、逆正粒序层理、沙纹层理、波状层理、块状层理等(图4(c)~(h))。平行层理主要包含2种类型:一种为中细砂岩中发育的以粒度或成分频繁变化显示的平行层理,多位于沉积相序中上部(图4(d)~(f));另一种为发育于含砾砂岩、中粗砂岩中,以相似粒径的沉积物成层发育且间隔距离大于1 cm为特征(图4(b)),为底床载荷搬运沉积物垂向叠置形成^[15]。逆正粒序层理以下部逆粒序和上部正粒序成对出现(图4(e)~(f)),部分逆正粒序层理的内部可见明显的内部侵蚀界面(图4(e));单一粒序对厚度可薄至1 cm,多以沉积物粒径的变化或炭质碎屑的发育为表现形式(图4(e)~(f)),反映洪水能量强弱频繁变化的特征^[13]。沙纹层理主要为单向沙纹且具有上攀特征,为异重流侧向推移速率大于等于沉积速率的标志(图4(g))。当异重流侧向推移速率小于沉积速率时,则形成波状层理(图4(g))。块状层理根据其内部物质组成及结构差异,可进一步分为内部均一块状层理砂岩(图4(h))、含泥质碎屑块状层理砂质泥岩(图4(a)、(h))。此外部分砂质泥岩形成内部均一块状层理多与下部块状砂岩相伴生,形成重力流混合事件层,是浊流向泥质碎屑流转化的沉积产物(图4(h))^[4]。

2.3.3 炭质碎屑

研究区异重流沉积中炭质碎屑发育,除了少数炭质碎屑以极薄层状方式与砂岩互层沉积外,大部分炭质碎屑呈相对集中的中薄层分布,内部可含极薄层粉砂层(图4(e)、(f));粉砂层局部由于半固结状态下的变形形成砂球状构造(图4(i))。这种炭质碎屑的成层发育特征是异重流漂浮相沉积的产物;在陆相盆地的淡水湖盆,由于异重流中流体的密度与湖盆水体密度基本一致,因此漂浮相一般不发育^[15]。沙三中亚段沉积时期为典型的近淡水环境,在这种情况下异重流沉积中的漂浮相沉积仍然发育(图4(e)、(f)、(i)),从而指示相对低密度沉积物在自身浮力作用下即可向上漂浮形成漂浮相沉积。

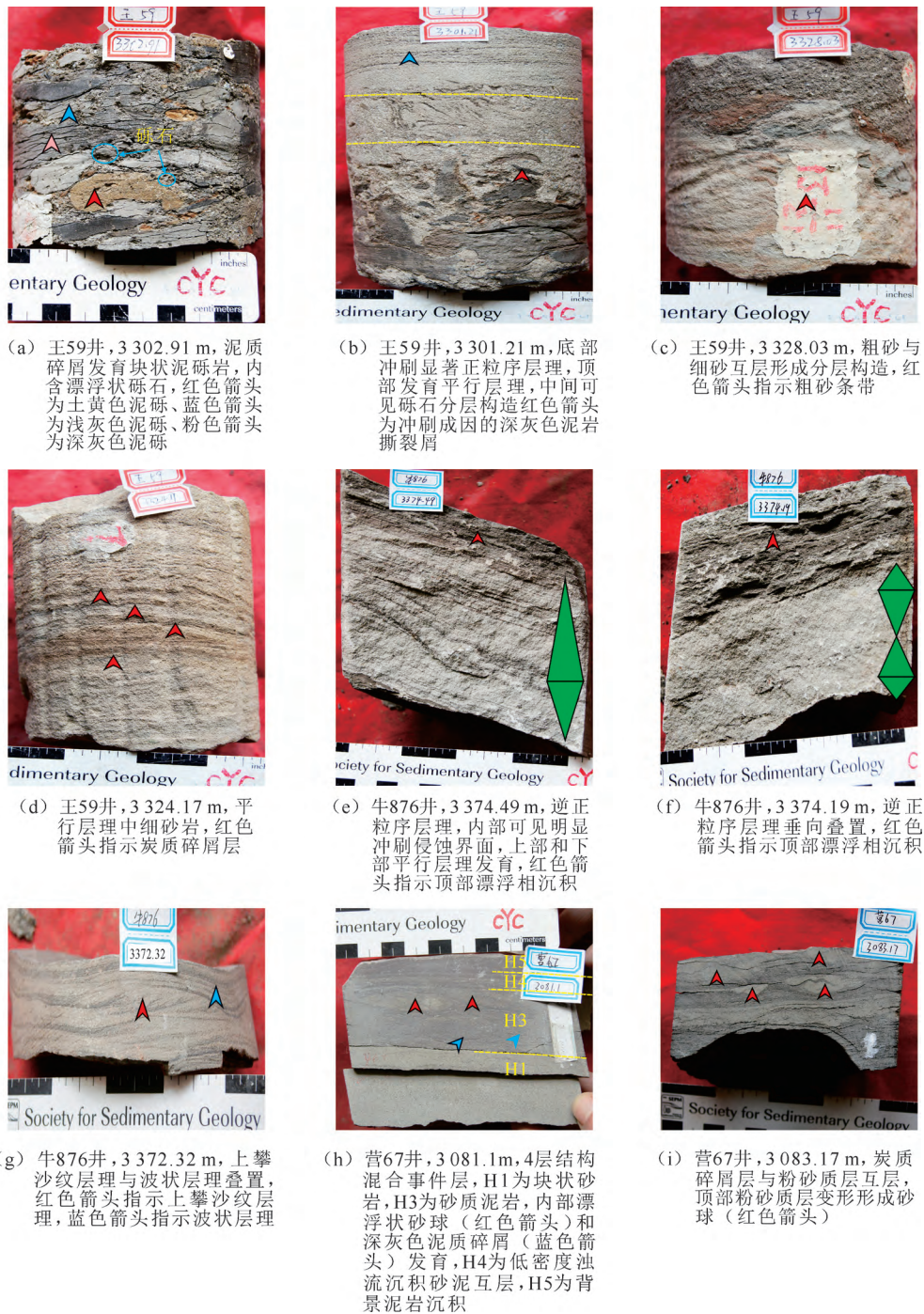


图 4 异重流沉积典型沉积构造特征

Fig. 4 Sedimentary characteristics of hyperpycnite

2.4 沉积序列

对相对沉积近端取芯井王 59 井和相对沉积远端取芯井牛 876 井的垂向沉积序列特征进行分析 (图 1)。王 59 井取芯段从下至上可以划分为 3 部分 (图 5)。下部 3 322~3 331 m 深度范围以砂岩与泥岩互层叠置沉积为主要特征, 砂质沉积正粒序层理发育, 冲刷充填构造常见, 粒度概率曲线指示碎屑流与高密度浊流共同发育, 整体反映不同能量洪水

在沉积近端冲刷叠置的特征 (图 5)。中部 3 302~3 322 m 深度范围以厚层块状泥质碎屑流沉积为主要特征, 局部夹泥岩沉积; 泥质碎屑流沉积内部不同颜色、不同形状泥质碎屑发育, 下部整体磨圆较好的土黄色泥砾发育, 上部深灰泥岩撕裂屑发育, 泥砾间沉积物粒度概率累积曲线以上拱弧形为主, 指示碎屑流沉积特征; 整体反映从下至上, 从浅水到深水的强烈侵蚀动力环境 (图 5)。上部 3 300.5~3 302 m

深度范围逆正粒序发育砂岩和正粒序含砾粗砂岩叠置,内部泥质碎屑发育,粒度概率曲线指示碎屑流与高密度浊流共同发育,整体反映洪水能量频繁变化和冲刷叠置的特征(图5)。根据沉积物特

征指示的沉积动力环境可知,下部主要为底床载荷主导异重流沉积,中部为异重流强烈侵蚀成因的泥质碎屑流沉积,上部为悬浮载荷主导的异重流沉积^[13]。

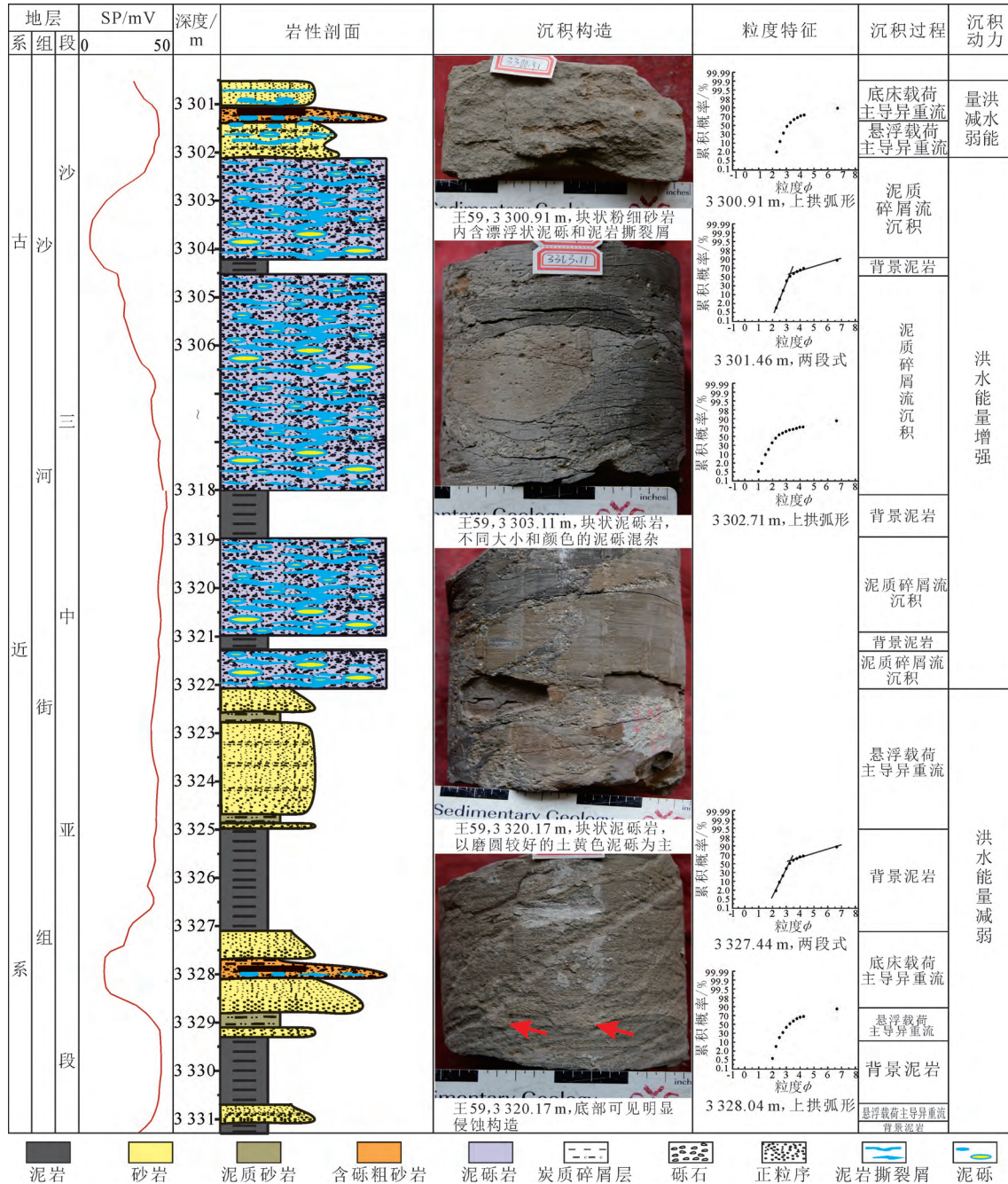


图5 王59井异重流沉积垂向组合特征

Fig. 5 Vertical depositional sequence of hyperpycnite in well Wang 59

牛876井取芯段从下至上可以划分为2部分(图6),下部3395~3400.5m深度范围从下至上由泥质沉积过渡为泥质砂岩、细砂岩,被含砾粗砂岩侵蚀再向上过渡为细砂岩沉积,含砾粗砂岩中泥质碎屑发育,整体为悬浮载荷主导的异重流沉积中夹中

间的底床载荷主导异重流沉积,指示一个洪水能量由弱变强再逐渐减弱的沉积旋回(图6)。上部3371~3378.5m深度范围从下至上由泥质沉积过渡为泥质砂岩、细砂岩叠置,向上发育薄层泥岩后过渡为薄层沙纹层理发育的细砂岩沉积,粉细砂岩中

炭质碎屑层、平行层理、沙纹层理常见,整体为悬浮载荷主导的异重流沉积指示一个洪水能量由弱变强再逐渐减弱的沉积旋回,其内部沉积物粒度和沉积构造的变化进一步指示洪水能量强弱的频繁变化(图 6)。

在砂岩铸体薄片同样可见炭质碎屑成层排列形成的纹层、沉积物粒度垂向上频繁变化构成的逆正粒序沉积序列的叠置,进一步指示相对远端的异重流沉积中逆正粒序更为发育的特征^[9-10]。

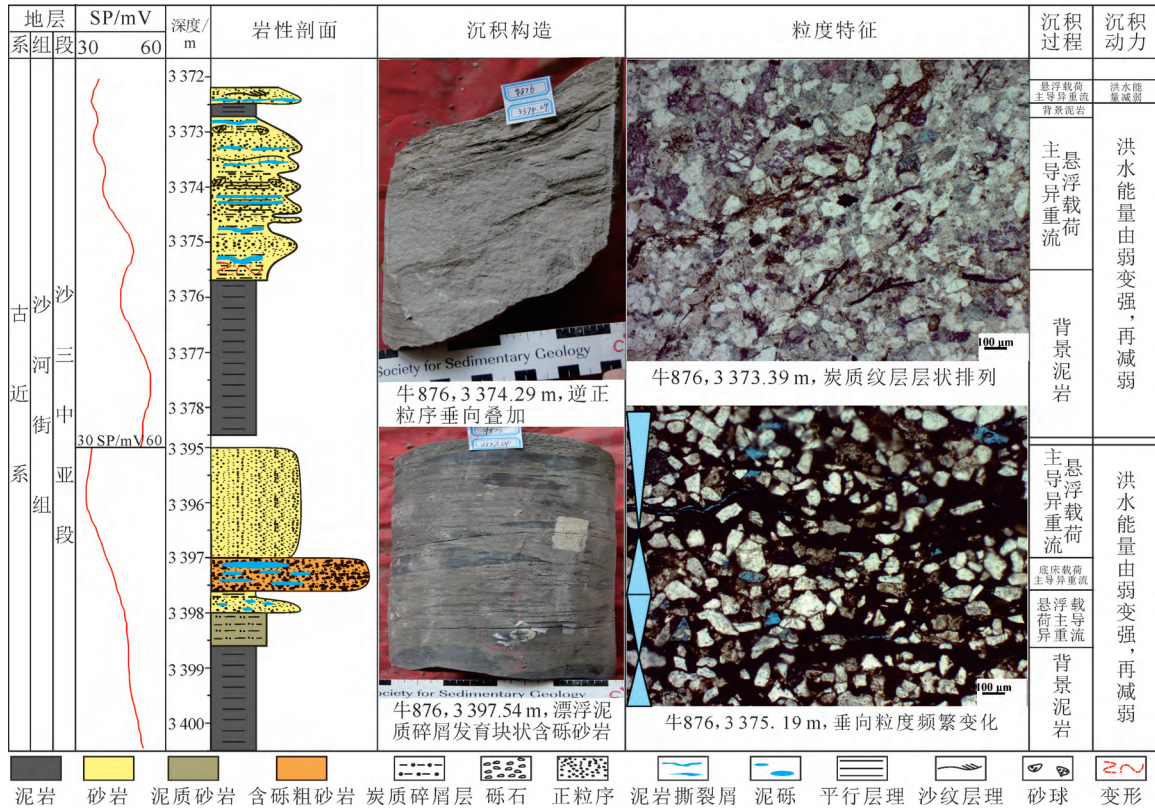


图 6 牛 876 井异重流沉积垂向组合特征

Fig. 6 Vertical depositional sequence of hyperpycnite in well Niu 876

3 异重流沉积分布特征

3.1 异重流沉积平面分布特征

在重力流沉积特征及典型取芯段岩相特征分析的基础上,以沉积作用类型识别为依据,以地震属性、砂岩厚度、砂泥岩体积分数、测井相等特征为约束条件,探究研究区深水重力流砂体在平面和剖面上的分布特征(图 7、8)。研究区深水重力流砂体沉积期三角洲砂体分布范围十分局限,河流洪水期携带有大量沉积物的高密度流体在洪水动力和自身重力的作用下能够直接越过三角洲沉积区,潜入湖底,在地形坡度和流体动能的综合作用下沿底部的低洼地形向深水盆地搬运,形成长条状沿北西方向展布的深水重力流砂体。这些条带状砂体在均方根地震属性和砂地比图上都能得到清晰的显示(图 8(a)),且二者之间存在较好的对应关系。受盆地相对低洼地貌的控制,沿王 14—王 59—牛 876 井方向分布的条带状砂体属于湖盆大型重力流水道沉

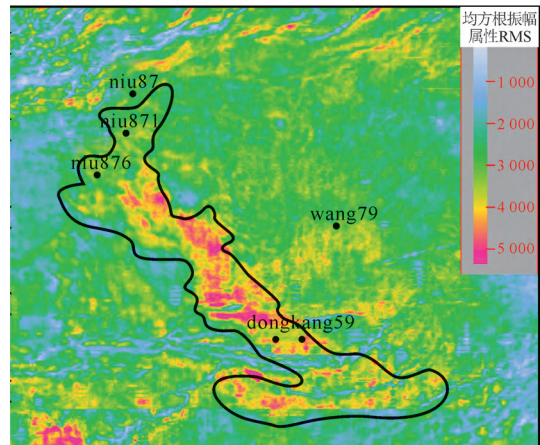


图 7 东营凹陷东坡异重流沉积均方根地震属性平面分布

Fig. 7 RMS seismic attribute distribution of hyperpycnite in the east slope of Dongying Sag

积,水道宽度为 1~3 km,长度约为 16 km,在沉积近端以碎屑流沉积为主,伴随搬运距离的增加,碎屑流逐渐转化为底床载荷主导的异重流沉积,在沉积远

端以悬浮载荷主导的异重流沉积为主(图8(a))。

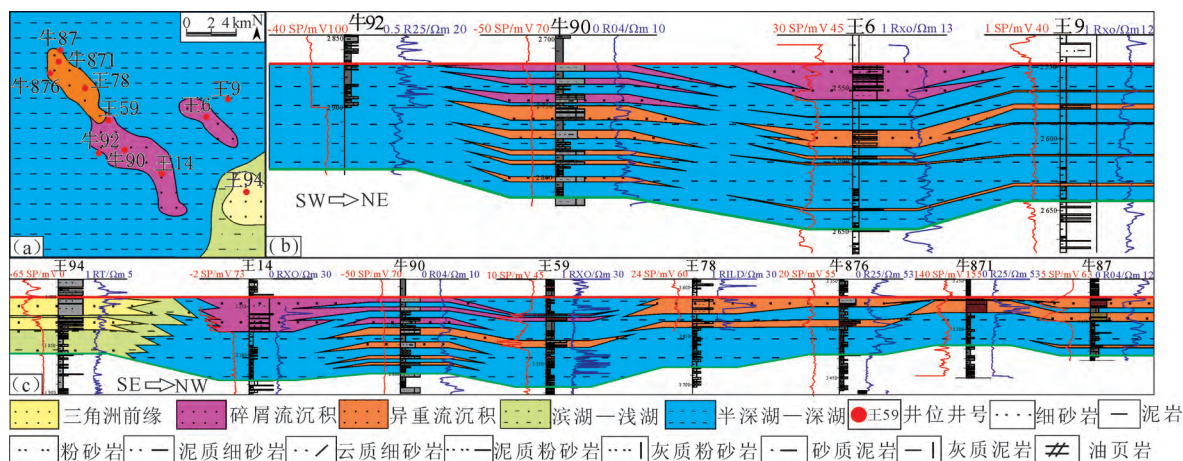


图8 东营凹陷东坡异重流沉积分布特征

Fig. 8 Distribution pattern of hyperpycnite in the east slope of Dongying Sag

3.2 异重流沉积剖面分布特征

平行于沉积物搬运方向沿重力水道走向,砂体连续性较好,沉积近端以碎屑流沉积为主,沉积远端以异重流沉积为主,王59井附近为碎屑流沉积与异重流沉积的分界位置(图8(c))。碎屑流沉积从靠近岸线到向盆地中心搬运,厚度逐渐减薄,异重流沉积厚度整体变化不显著,指示异重流沉积持续补给、长距离搬运稳定沉积的特征;局部的砂体减薄,如牛876井附近则指示重力水道的侧向迁移摆动特征。垂直于沉积物搬运方向,重力水道砂体呈透镜状展布,不同位置的水道砂体之间相对孤立分布。下部早期沉积以异重流沉积为主,单层砂体厚度薄,与泥岩之间频繁互层,指示能量相对较弱的多期洪水异重流事件垂向叠加的特征;上部晚期沉积以单层厚度相对较大的碎屑流沉积为主,指示洪水作用能量增强,同时发育碎屑流和异重流的沉积特征(图8(b))。

4 沉积机制及沉积模式

通过水槽模拟试验模拟湖盆异重流的形成及搬运演化过程发现(图9(a)~(c)),异重流在湖盆边缘下潜向深水盆地搬运的过程中会经历流体潜入区(图9(a))、流体稳定厚度区(图9(a))、流体膨胀区(图9(b))3个差异显著的演化阶段。流体潜入区是决定侵蚀作用程度和范围的主要控制区域,流体稳定厚度区是底床载荷主导异重流沉积范围,流体膨胀区则是悬浮载荷和漂浮沉积物沉积区(图9(c)、(d))。不同于前人认识,认为异重流在演化的晚期都会经历膨胀过程,导致低密度的炭质碎屑等

向上漂浮,最终成层富集的特征(图9(b)、(d)),这些成层富集的细碎屑与炭质碎屑形成在异重流沉积远端的混合事件层沉积(图4(h)、9(d))。这可能是淡水湖盆漂浮相沉积同样广泛发育主要原因。

综合深水重力流砂体沉积特征、分布规律和沉积机制认识,建立研究区重力流砂体沉积模式。研究区为洪水异重流直接入湖形成的深水重力流沉积,盆底地貌和洪水强弱共同控制重力流形成演化过程及其沉积砂体的分布(图10)。洪水作用初期能量强,携带砂、砾的高密度流体强烈的侵蚀作用导致泥质沉积物的急剧增加,流体整体转化为碎屑流沉积(图8(c)、9(d)),且主要分布在沉积近端^[4]。伴随流体能量的减弱,携带砂质沉积物为主的高密度流体进一步向深水盆地搬运,形成间隔分层构造发育的块状或正粒序砂岩沉积;随着流体能量的进一步减弱,其携带的细粒沉积物开始沉降,由于流体不具有侵蚀作用,因此其沉积物完整记录洪水能量变化,形成频繁叠置的逆正粒序沉积。同时洪水不断补给提供的侧向推力导致沙纹和上攀层理在流体演化晚期阶段发育;流体晚期进一步膨胀扩张,导致低密度炭质碎屑的漂浮并最终成层富集,转化为混合重力流沉积。洪水异重流的搬运演化整体经历“碎屑流→高密度异重流→低密度异重流→混合重力流”的演化过程。相对局限的局部负地形一方面限制流体的溢散,从而有利于保持高能量状态;另一方面控制搬运路径及重力流砂体的分布,形成条带状的重力流砂体(图10)。条带状重力流砂体的沉积相带分异不显著,在最前端沉积物散开,形成朵叶沉积,但分布范围较为局限(图7、8(a)、10)。

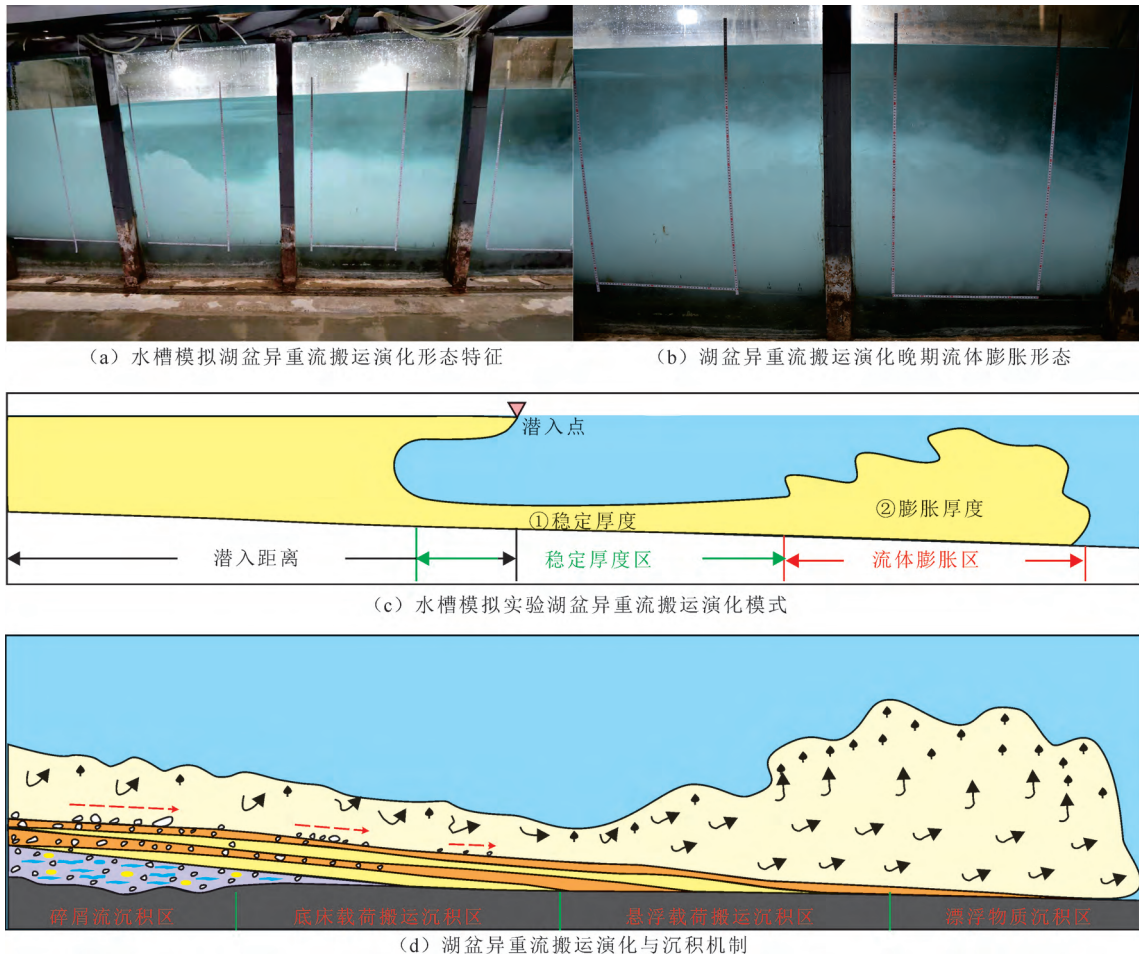


图 9 异重流沉积机制

Fig. 9 Formation mechanisms of hyperpycnite

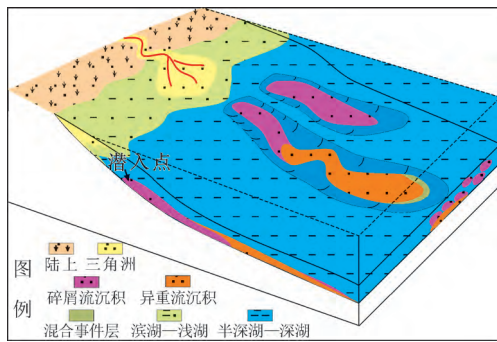


图 10 东营凹陷东坡异重流沉积模式

Fig. 10 Depositional model of hyperpycnite in the east slope of Dongying Sag

5 结 论

(1) 异重流沉积以泥砾岩、细砂岩和粉砂岩沉积为主,杂基平均质量分数为 12.6%,成分成熟度较低,粒度概率曲线以反映重力流沉积的上拱弧形、宽缓上拱型和低斜两段式为主。

(2) 异重流沉积近端侵蚀充填构造发育,浅水和深水沉积砂泥混杂;典型的层理构造包含平行层

理、逆正粒序层理、沙纹层理、波状层理、块状层理;沉积远端炭质碎屑发育,包含极薄层状方式与砂岩互层沉积和集中的中薄层富集 2 种形式。

(3) 异重流沉积近端以泥质碎屑流和底床载荷主导的高密度异重流沉积垂向叠置为主要特征,沉积远端以悬浮载荷主导的低密度异重流沉积和漂浮沉积垂向叠置为主要特征。平面分布呈条带状,在沉积近端以碎屑流沉积为主,远端以异重流沉积为主。

(4) 湖盆异重流搬运演化过程经历流体潜入区、流体稳定厚度区和流体膨胀区,流体潜入区是决定侵蚀作用程度和范围的主要控制区域,流体稳定厚度区是底床载荷主导异重流沉积范围,流体膨胀区则是悬浮载荷和漂浮沉积物沉积区。

参考文献:

[1] 李相博,刘化清,潘树新,等. 中国湖相沉积物重力流研究的过去、现在与未来[J]. 沉积学报,2019,37(5): 904-921.
LI Xiangbo, LIU Huaqing, PAN Shuxin, et al. The past, present and future of research on deep-water sedimentary gravity flow in Lake Basins of China[J]. Acta

- Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5): 904-921.
- [2] 邱振, 邹才能. 非常规油气沉积学: 内涵与展望[J]. 沉积学报, 2020, 38(1): 1-29.
QIU Zhen, ZOU Caineng. Unconventional petroleum sedimentology: connotation and prospect[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(1): 1-29.
- [3] 杨田, 操应长, 田景春. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识[J]. 沉积学报, 2021, 39(1): 88-111.
YANG Tian, CAO Yingchang, TIAN Jingchun. Discussion on research of deep-water gravity flow deposition in Lacustrine Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(1): 88-111.
- [4] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 234-248.
CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Yanzhong, et al. Types and genesis of deep-water hybrid event beds comprising debris flow and turbidity current[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 234-248.
- [5] YANG R C, JIN Z J, VAN LOON A J, et al. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnite origination in the Late Triassic Ordos Basin, central China: implications for unconventional petroleum development [J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(1): 95-117.
- [6] YANG T, CAO Y C, LIU K Y, et al. Gravity flow deposits caused by different initiation processes in a deep-lake system [J]. AAPG Bulletin, 2020, 104(7): 1643-1499.
- [7] TALLING P J, ALLIN J, ARMITAGE D A. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits[J]. Journal of Sedimentary Research, 2015, 85: 153-168.
- [8] 操应长, 金杰华, 刘海宁, 等. 中国东部断陷湖盆深水重力流沉积及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 1-12.
CAO Yingchang, JIN Jiehua, LIU Haining, et al. Deep-water gravity flow deposits in a lacustrine rift basin and their oil and gas geological significance in eastern China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 1-12.
- [9] 杨仁超, 金之钧, 孙冬胜, 等. 鄂尔多斯晚三叠世湖盆异重流沉积新发现[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 10-20.
YANG Renchao, JIN Zhijun, SUN Dongsheng, et al. Discovery of hyperpycnal flow deposits in the Late Triassic Lacustrine Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 10-20.
- [10] 杨田, 操应长, 王艳忠, 等. 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[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 1048-1059.
YANG Tian, CAO Yingchang, WANG Yangzhong, et al. 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 Jiyang Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(8): 1048-1059.
- [11] BATES C C. Rational theory of deltaformation [J]. Bulletin of American Association of Petroleum Geology, 1953, 37(9): 2119-2162.
- [12] MULDER T, SYYITSKI J P M. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans [J]. Journal of Geology, 1995, 103: 285-299.
- [13] MULDER T, SYYITSKI J P M, MIGEON S, et al. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20: 861-882.
- [14] MULDER T, CHAPRON E. Flood deposits in continental and marine environments: character and significance [J]. AAPG Studies in Geology, 2011, 61: 1-30.
- [15] ZAVALA C, ARCURI M. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: origin and distinctive characteristics [J]. Sedimentary Geology, 2016, 337: 36-54.
- [16] XIAN B Z, WANG J H, GONG C L, et al. Classification and sedimentary characteristics of lacustrine hyperpycnal channels: triassic outcrops in the south Ordos Basin, central China [J]. Sedimentary Geology, 2018, 368: 68-82.
- [17] PLINK-BJÖRKLUND P P, STEEL R J. Initiation of turbidity currents: outcrop evidence for Eocene hyperpycnal flow turbidites [J]. Sedimentary Geology, 2004, 165: 29-52.
- [18] BHATTACHARYA J P, MACEACHERN J A. Hyperpycnal Rivers and prodeltaic shelves in the cretaceous seaway of North America [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009, 79(4): 184-209.
- [19] WILSON R D, SCHIEBER J. Muddy prodeltaic hyperpycnites in the lower genesee group of central New York, USA: implications for mud transport in epicontinental seas [J]. Journal of Sedimentary Research, 2014, 84: 866-874.
- [20] 操应长, 杨田, 王健, 等. 东营凹陷南坡沙四上亚段滩坝砂岩有效储层成因[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 1-9.
CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Jian, et al. Genesis of effective reservoirs of beach-bar sandstone in upper part of the fourth member of Shahejie formation in the southern slope of Dongying sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013, 37(6): 1-9.

(编辑 李娟)