

渤海湾盆地辽东湾坳陷盆地隆起缓坡带重力流沉积形态及其控制因素

蒋 恕¹, 王 浩¹, 郭 涛², 张如才², 杜晓峰², 张钰莹¹, 刘恩豪¹, 王 华¹

[1. 中国地质大学(武汉) 构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北 武汉 434100;

2. 中海石油(中国)有限公司 天津分公司, 天津 300459]

摘要:随着油气勘探开发的深入,重力流沉积形成的岩性圈闭逐渐成为人们关注的焦点。渤海湾盆地辽东湾坳陷辽西凸起东部斜坡带(辽中凹陷西斜坡)勘探程度低,近期在该盆地隆起缓坡带发现的具高密度浊流性质的重力流扇体表现出良好的岩性地层油气藏勘探前景。建立辽西凸起东斜坡古近系东营组三段高精度层序地层格架,并基于地震、测井及岩心资料对体系域内重力流沉积的形态及其控制因素开展了综合研究。辽西凸起东部缓坡带主要发育4种形态的斜坡扇:舌形扇、花瓣扇、朵叶扇及河道扇。斜坡陡缓程度和重力流物质来源(远源辫状河三角洲前缘)的富砂程度共同控制扇体形态。坡折类型影响湖底扇长宽比:坡折类型越复杂,坡度越陡,湖底扇的长宽比越大,表现为长舌形;坡折类型越简单,坡度越缓,湖底扇的长宽比越小,表现为朵形。物源富砂性决定湖底扇河道化程度及稳定性:砂质含量越高,河道的成型性越差;泥质含量越高,河道越稳定。因此,陡-富砂地质条件易形成舌形扇,缓-富砂地质条件易形成朵叶扇,缓-富泥地质条件易形成河道扇,花瓣扇为过渡型。

关键词:重力流;高密度浊流;沉积形态;层序地层;盆地凸起缓坡带;辽东湾坳陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Geomorphology of gravity flow deposits in the gentle slope zone of intra-basinal high in the Liaodong Bay Depression, Bohai Bay Basin and its controlling factors

Jiang Shu¹, Wang Hao¹, Guo Tao², Zhang Rucui², Du Xiaofeng², Zhang Yuying¹, Liu Enhao¹, Wang Hua¹

[1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 434100, China; 2. Tianjin Branch of CNOOC, Tianjin 300459, China]

Abstract: Lithologic traps formed by gravity flow deposits have gradually become the focus of hydrocarbon exploration and development. The eastern slope of Liaoxi uplift or the western slope of Liaozhong Sag is still at an early stage of exploration in the Liaodong Bay Depression, Bohai Bay Basin. A gravity flow fan of high-density turbidite nature was drilled recently in the gentle slope zone of the intra-basinal uplift and shows a potential target for future exploration of lithologic-stratigraphic reservoirs in the slope zone. In the study, a high-resolution sequence stratigraphic framework of the 3rd member of the Paleogene Dongying Formation in the study area is established at first, followed by a comprehensive study on the geomorphology and its controlling factors of gravity flow deposits within the systems tracts based on an integrated analysis of seismic, logging, and core data. The results show that four types of slope fans are mainly developed in the gentle slope zone to the east of Liaoxi uplift, namely the ligulate fan, petal-shaped fan, lobe-shaped fan and channel-shaped fan, the morphology of which is determined by slope gradient and sand richness of gravity flow sediment sources (the distally-sourced braided river delta front). Among others, the more complex the slope break and the steeper the slope, the larger the aspect ratio of the sublacustrine fan is, displaying in a long ligulate shape, while the simpler the slope break type and the gentler the slope, the smaller the aspect ratio of the sublacustrine fan is, displaying in a lobe shape. On the other hand, the sand richness of sediment source determines

收稿日期:2022-01-16;修订日期:2022-04-25。

第一作者简介:蒋恕(1976—),男,博士、教授,沉积储层与能源资源勘探开发。E-mail: jiangsu@cug.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41972117);国家科技重大专项(2016ZX05024-002-006);中海石油(中国)有限公司天津分公司科研项目(CCL2020TJX0NST1284)。

the degree of channelization of sublacustrine fan and its stability. The higher the sand richness, the lower the channel stability is, while the higher the argillaceous sediment content, the higher the channel stability is. Therefore, the steep slope rich in sand is prone to form a ligulate fan, the gentle slope rich in sand is prone to form a lobe-shaped fan, and the gentle slope rich in argillaceous sediment is prone to form a channel-shaped fan; the petal-shaped fan is but of a transitional type.

Key words: gravity flow, high-density turbidite, sedimentary morphology, sequence stratigraphy, gentle slope zone of intra-basinal uplift, Liaodong Bay Depression, Bohai Bay Basin

引用格式:蒋恕,王浩,郭涛,等. 渤海湾盆地辽东湾坳陷盆中隆起缓坡带重力流沉积形态及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 823-832. DOI: 10. 11743/ogg20220407.

Jiang Shu, Wang Hao, Guo Tao, et al. Geomorphology of gravity flow deposits in the gentle slope zone of intra-basinal high in the Liaodong Bay Depression, Bohai Bay Basin and its controlling factors[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 823-832. DOI: 10. 11743/ogg20220407.

随着鲍马序列低密度浊流的沉积构造和岩相特征被广大地质学家接受并广泛应用于深水重力流沉积的研究,人们对重力流沉积的认识日趋丰富^[1]。重力流沉积中,“正粒序”的沉积构造特征是识别浊流沉积的唯一可靠标志^[2-3],但随着更多深水砂岩的发现,不具“紊流”沉积特征的块状和逆粒序砂岩难以用浊流来解释。因此,Lowé根据流体的流动状态将重力流分为低密度浊流和高密度浊流^[4-5]。高密度浊流形成的砾石相、块状粗砂岩相和低密度浊流形成的鲍马序列的结合可以很好地解释复杂重力流沉积的演化过程。

随着被动大陆边缘深水砂岩沉积模式的提出,浊积扇沉积相模式研究也在飞速发展。基于鲍马序列的现代海底扇模式^[6-7]、古代扇模式^[8]及Walker提出的综合扇模式^[9]等在20世纪70—80年代占据了主导地位。随着岩心资料的丰富和地球物理资料品质的提升,Shanmugam等学者基于碎屑流理论(高密度浊流)建立了“舌形砂体”的深水斜坡沉积模式^[10-11]。关于浊积扇的形态,Reading和Richards根据物源类型(线物源、点物源)和物源系统(富砾、富砂、砂-泥混合及富泥)组合特征对扇体的形态进行了总结^[12-14]。

随着中国东部油气勘探程度的加深,湖底扇形成的岩性圈闭成为重点勘探目标^[15-18]。碎屑流斜坡沉积模式在松辽盆地^[19]、鄂尔多斯盆地^[20-23]和渤海湾盆地^[24-26]等岩性圈闭的勘探工作中起到了很好的指导作用。但鲜有学者对扇体的形态及其控制因素进行探讨^[27-28],渤海湾盆地辽东湾坳陷盆中隆起——辽西凸起东部缓坡带(辽中凹陷西斜坡)在东三层序(SQD3)沉积时期发育多种形态的高密度湖底扇沉积。这不同于传统被动大陆和主动大陆边缘的低密度浊积扇,加上较远的物源越过西部凹陷和盆内凸起,所以也不同于典型断陷和凹陷湖相盆地从物源区

直接搬运下来的单一斜坡带及湖盆沉积中心的湖底扇。那么砂体是如何翻越辽西凹陷东部的辽西凸起而沉积在斜坡上的?这些不同形态的湖底扇都有哪些沉积相模式及其成因?为此,本文在层序地层格架内识别重力流沉积特征和物源性质的基础上,探讨盆中隆起的斜坡带和物源性质对辽西凸起东部缓坡带(辽中凹陷西斜坡)湖底扇形态的控制作用,进而揭示湖底扇沉积砂体形态、展布特征、形成机理及油气勘探的有利区域。

1 区域地质概况

辽东湾坳陷位于渤海东北部,整体呈北东走向,属于渤海湾盆地的一级构造单元,呈现凸-凹相间的构造格局。辽西凸起位于辽东湾坳陷中部盆中隆起带,西部以北东向分段走滑断层为界,与辽西凹陷相邻,东部为缓坡斜坡背景,与辽中凹陷相邻^[29](图1)。辽东湾坳陷古近纪经历了3个构造演化阶段:①古新世—始新世中期伸展裂陷阶段;②始新世晚期—渐新世早期第一裂后热沉降阶段;③渐新世东营期走滑拉分与地幔和上、下地壳非均匀不连续伸展叠加的再次裂陷阶段^[30]。

辽东湾坳陷东营组从下至上可划分为东三段(东营组三段)、东二下亚段、东二上亚段及东一段。东三段沉积时期,湖盆快速裂陷,辽西凸起北段没于水下且缺乏远源供给,主要发育细粒沉积,外源碎屑沉积主要集中于凸起中、南部。低位体系域沉积时期,辽西凸起呈岛链状出露水面,零星发育辫状河三角洲沉积,缓坡带发育局限的重力流沉积,辽中凹陷以湖相厚层深灰色泥岩沉积为主。湖侵体系域沉积时期,研究区辽西凸起整体没于水下,由于湖平面的快速上升,凸起区也变为有效的可容纳空间,且对西部物源

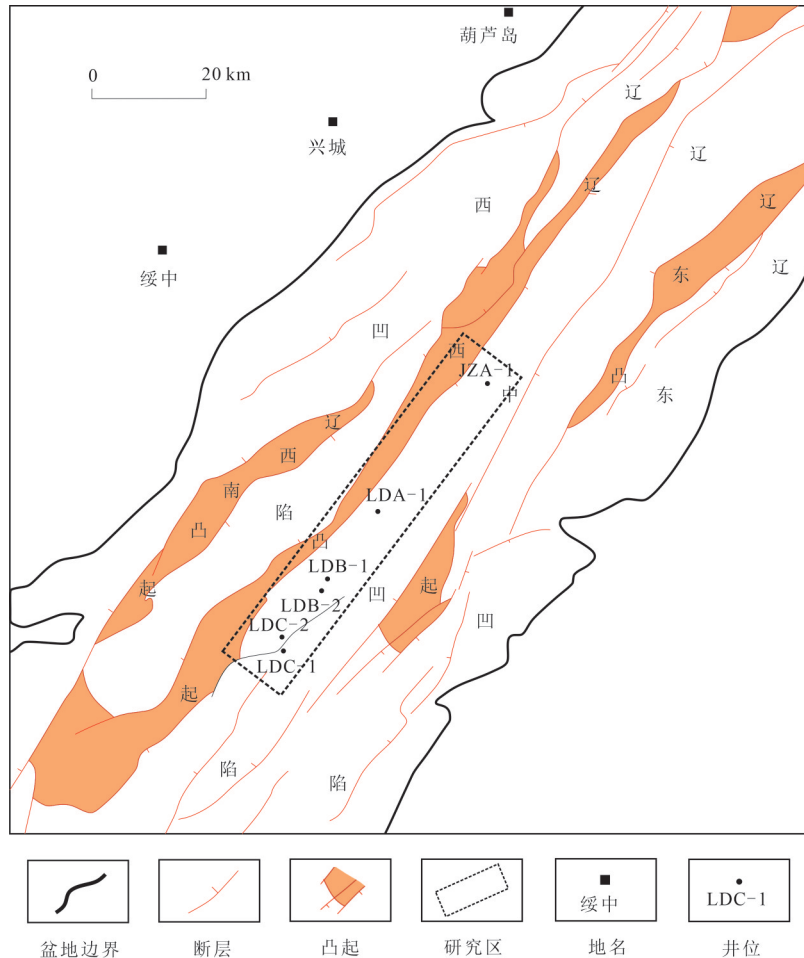


图1 辽东湾坳陷区域构造和研究区位置

Fig. 1 Location map showing the Liaodong Bay Depression and the study area

带来的沉积阻挡作用进一步减弱。辽西凹陷辫状河三角洲沉积大量进积到凸起上,缓坡带发育成规模的重力流沉积。高位体系域沉积时期,辽西凸起对西部远源的阻挡作用基本消失,辽西凹陷基本被辫状河三角洲沉积充填,并通过凸起上的通道大量进入凸起及斜坡带,凸起及斜坡带以辫状河三角洲前缘沉积为主。

2 重力流沉积特征

2.1 沉积物特征

观察已钻井取心资料发现,重力流沉积内部主要发育两种岩相:底部为纯净的粗-中砂岩,厚度 20 cm (图 2a),其中偶见撕裂泥屑及泥砾,可见火焰状构造、碟状构造等泄水构造(图 2b—d);顶部岩相呈不完整的鲍马序列: T_b 段为平行层理,厚 1.5 cm; T_c 段为波状变形层理,厚 3.5 cm; T_d 段为水平层理,厚 1 cm; T_e 段为块状泥岩,一般厚 2 cm(图 2a)。

底部块状砂岩偶见撕裂泥屑,缺乏粒序构造,与高密度浊流 S_3 段类似,顶部过渡为低密度浊流沉积。新的一期重力流沉积与下伏重力流沉积顶部的泥岩呈岩性不整合接触,可见侵蚀面(图 2a)。泥岩颜色主要表现为灰褐色,是来自浅水区的晚期低能量浊流形成的沉积,半深湖区存在的灰褐色泥岩也是识别重力流沉积的一个重要标志。低密度浊流 T_e 段偶见灰色湖相泥岩沉积。

薄片资料分析发现,研究区重力流沉积主要为含粗砂中-细砂岩,分选一般,碎屑颗粒呈次棱角-次圆状,颗粒支撑结构,主要是点-线接触(图 2e,f)。杂基的含量和性质可以反映介质的流动特性与碎屑组分的分选性,因而也是碎屑岩结构成熟度的重要标志。典型浊流沉积中含有大量杂基,由此形成的沉积物是以杂基支撑结构为特征的。但研究区高密度重力流沉积杂基含量少,以胶结物充填为主,颗粒支撑,表明滑塌型高密度浊流的沉积物继承了辫状河三角洲前缘沉积的结构成熟度。

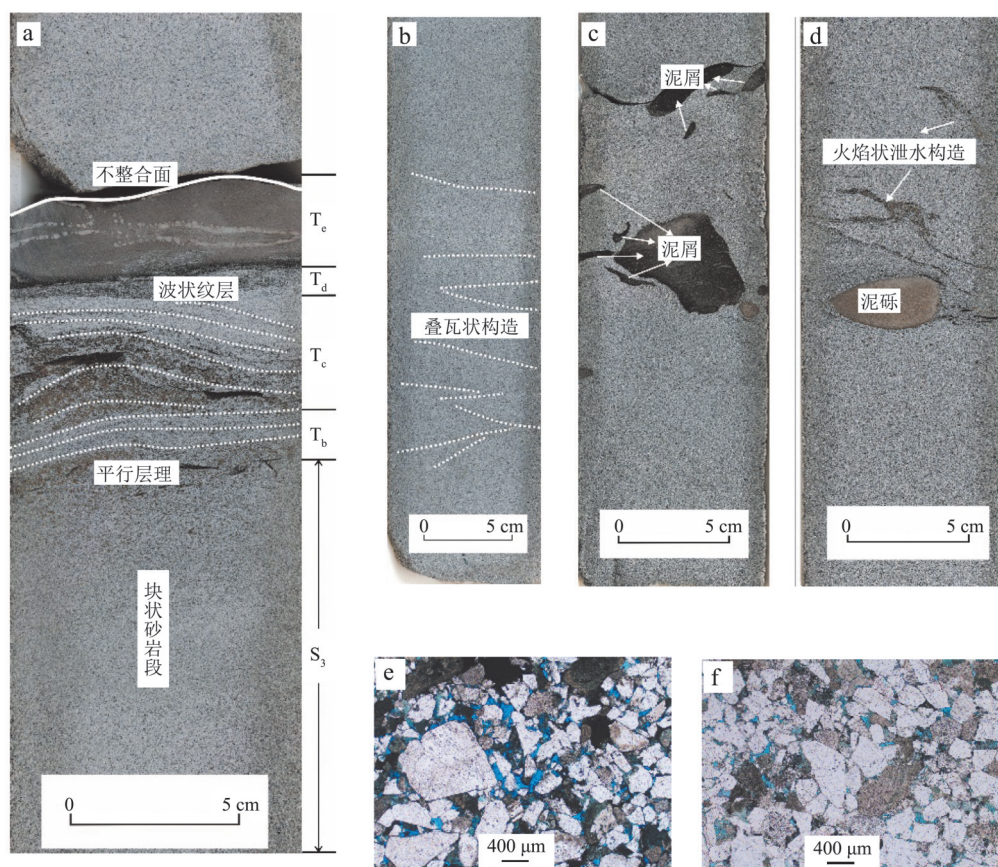


图2 辽东湾坳陷辽西凸起东斜坡LDB-2井高密度浊流和低密度浊流典型识别标志(井位位置见图1)

Fig. 2 Typical markers to identify high-density and low-density turbidites in Well LDB-2 in the eastern slope zone of Liaoxi uplift, Liaodong Bay Depression (see Fig. 1 for the well location)

- a. 高密度浊流 S_3 段及低密度浊流鲍马序列 T_b-T_e 段, 岩心照片, 埋深3 226.52 ~ 3 226.72 m; b. 碟状泄水构造, 岩心照片, 埋深3 225.20 ~ 3 225.50 m;
c. 撕裂泥屑, 岩心照片, 埋深3 131.06 ~ 3 230.79 m; d. 火焰状泄水构造, 岩心照片, 泥砾, 埋深3 229.82 ~ 3 230.54 m; e. 高密度浊流沉积, 单偏光, 埋深3 230.79 m; f. 高密度浊流沉积, 单偏光, 埋深3 231.27 m
(T为低密度浊流; S为高密度砂质浊流。)

2.2 粒度结构特征

研究结果显示, LDB-1井岩心样品粒度累积曲线上粒径 C 值(1%颗粒对应粒径)区间为576.148 ~ 949.738 μm , 粒径 M 值(50%颗粒对应粒径)区间为165.465 ~ 285.918 μm ; LDC-1井 C 值区间为414.386 ~ 1 308.376 μm , M 值区间为154.327 ~ 403.252 μm 。结果表明, C 值和 M 值的变化幅度较大, 并且LDB-1井湖侵体系域高密度浊流沉积与LDC-1井高位体系域高密度浊流沉积 $C-M$ 中线大致平行于 $C-M$ 基线(图3a, b)。

LDB-1井湖侵体系域高密度浊流沉积粒度分布直方图呈正偏态单峰式, 平均粒径 Φ 值为2.986, 峰态为1.153; LDC-1井高位体系域高密度浊流沉积概率值累积曲线样式类似于LDB-1井, 呈上拱两段式, 平均粒径 Φ 值为2.612, 峰态为1.091, 粒度分布直方

图呈正态单峰式, 分选系数为2.45(图3c, d)。(低密度)浊流沉积的概率值累积曲线经典样式近似为一段式, 斜率低, 沉积物分选很差, 悬浮总体含量大; 而高密度浊流沉积的砂岩粒度曲线特征明显异于经典样式, 概率值累积曲线呈上拱两段式, 分别代表跳跃次总体和悬浮次总体, 斜率较大, 分选较好, 曲线呈平缓过渡, 表明两个次总体混合度大, 沉积分异程度低。由于液化流以“冻结”状态搬运直至沉积, 重力流沉积很大程度上继承了辫状河三角洲前缘沉积的结构成熟度, 因此滑塌型高密度浊流沉积常常具有较好的分选性。

3 沉积相类型及砂体形态

辽西凸起缓坡带斜坡扇沉积虽然形态不同, 但浊流流体与高密度浊流的性质是一致的, 高密度浊流沉积形成的河道扇和舌形扇概率值累积曲线形态一致

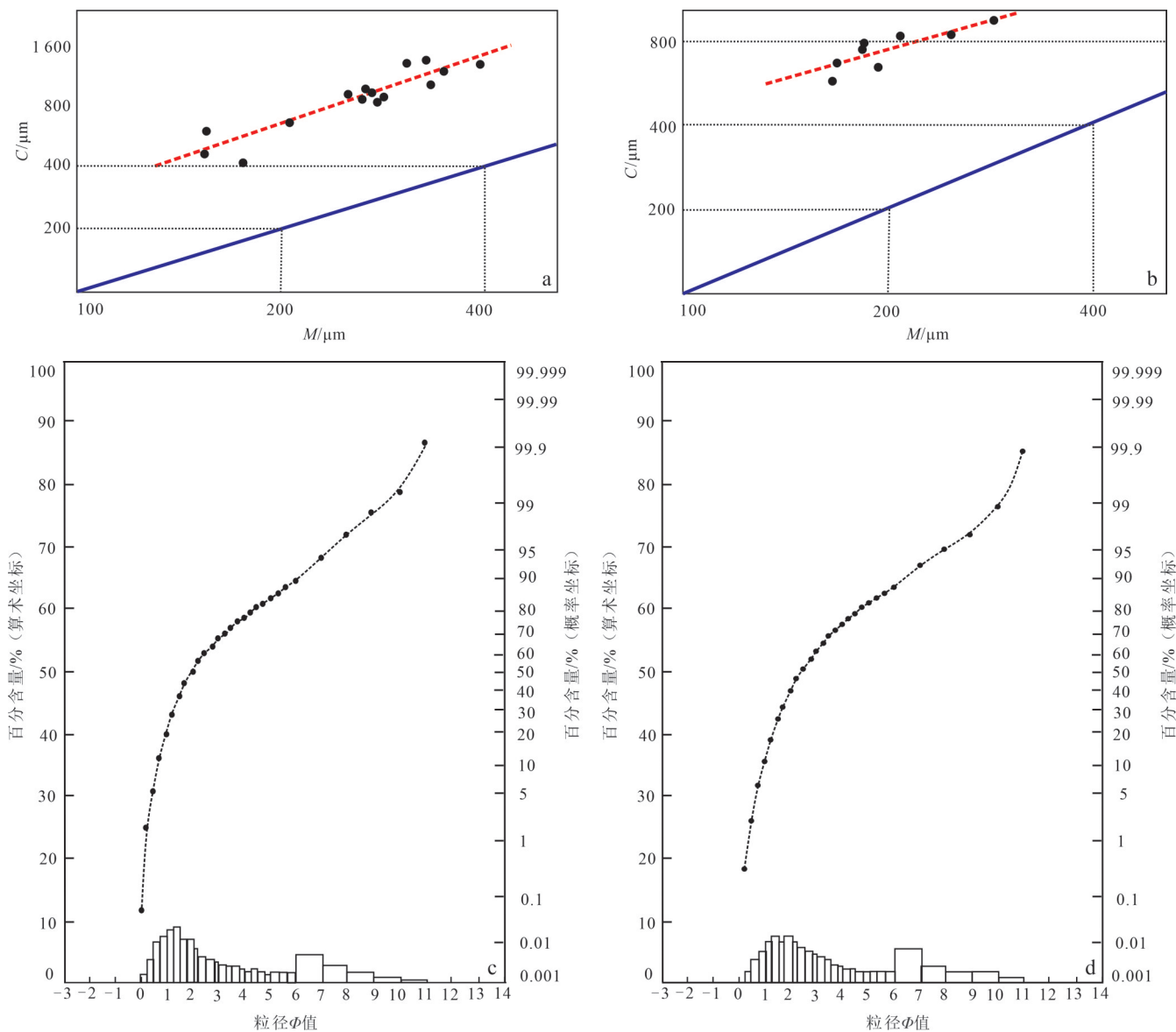


图3 辽东湾坳陷辽西凸起东斜坡岩心样品粒度结构特征

Fig. 3 Diagrams showing the grain size distribution in core samples from the eastern slope zone of Liaoxi uplift, Liaodong Bay Depression
a. LDC-1井, 高位体系域; b. LDB-1井, 湖侵体系域; c. LDC-1井, 埋深 2 755 m; d. LDB-1井, 埋深 3 330 m

(图3), 沉积物的微观结构也一样(图2)。因此, 辫状河三角洲前缘沉积滑塌形成的高密度浊流沉积在缓坡带表现为不同的外貌形态。

3.1 舌形扇

舌形扇地震相特征异于上覆和下伏的低频、弱振幅反射泥岩, 表现为中频、强振幅以及具有一定外包络形态的丘形体, 内部地震同相轴连续性一般, 具一定前积反射结构(表1)。舌形扇沉积在均方根振幅(RMS)属性平面中可见清晰的“舌形”外貌(表1)。舌形扇GR曲线测井相特征表现为齿化箱形(图4a), 表明其由多期重力流事件累积形成。根据岩心观察, 单期重

力流事件形成的沉积厚度可达1 m左右, 两期高密度重力流块状砂体以低密度浊流沉积分割, 厚度一般为0.2 m左右, 这也是箱形曲线齿化的主要原因。单组舌形扇砂体厚度可达40 m以上(图4a), 是该类湖底扇沉积砂体发育和油气富集的主要沉积相带。

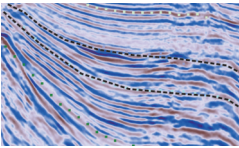
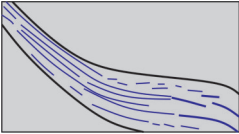
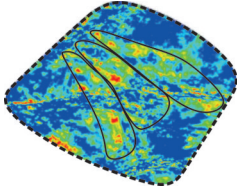
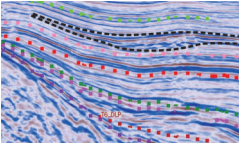
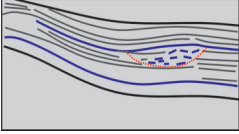
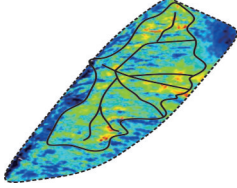
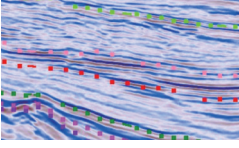
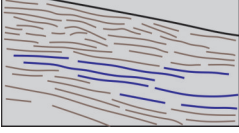
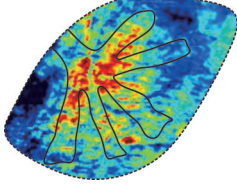
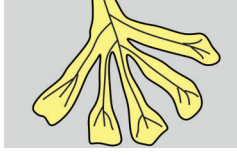
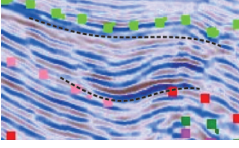
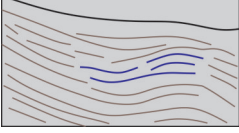
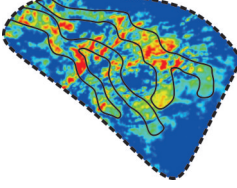
舌形扇主要发育于LDB构造区, 包括内扇滑塌体、中扇舌形及外扇席状砂亚相。辫状河三角洲前缘沉积在外力作用下发生液化滑塌, 在斜坡上首先形成滑塌沉积, 其沉积物的主要特征是含有大量的漂砾泥砾及撕裂泥屑, 块状砂岩内部含有丰富的液化变形构造。垮塌体进一步液化形成高密度浊流, 沿斜坡快速向下搬运形成长宽比较大的舌形扇沉

积,其沉积物沉积构造主要表现为缺乏牵引构造的块状,内部偶见漂浮泥砾及撕裂泥屑(图2c)。剩余细粒物质组成的浊流继续向前在舌形扇前缘及侧翼形成席状砂沉积。

3.2 朵叶扇

分流河道的地震相特征表现为具一定外包络形态的透镜体,底蚀现象明显,内部表现为蠕虫状反射;朵

表1 辽东湾坳陷辽西凸起东斜坡东三层序(SQD3)中不同类型高密度浊积扇体对比
Table 1 Comparative analysis of different types of high-density turbidite fans within SQD3 in the eastern slope zone of Liaoxi uplift, Liaodong Bay Depression

砂体形态	沉积亚相	测井相	地震相	形态	控制因素
舌形扇	内扇:滑塌体 中扇:舌形扇 外扇:席状砂	舌形扇:齿化箱形	 	 	陡-富砂
朵叶扇	内扇:主供水道 中扇:朵叶体、分流水道 外扇:席状砂	朵叶体:指形、齿化漏斗形	 	 	缓-富砂
花瓣扇	内扇:主供水道 中扇:瓣状体、分流水道 外扇:席状砂	瓣状体:齿化漏斗形	 	 	缓-砂/泥
河道扇	内扇:主供水道 中扇:分流水道 外扇:席状砂	分流河道:齿化箱形	 	 	缓-富泥

叶体的地震反射特征表现为中频、强振幅单轴反射,同相轴连续性很好;RMS属性平面中可直观看到大的朵状外包络形态(表1)。朵叶体测井曲线形态表现为指形和齿化漏斗形,表明其由多期决口小朵叶体复合形成,朵叶体砂体以湖相泥岩间隔,单组砂体厚度约4 m(图4b)。

朵叶扇主要发育于JZA构造区,包括内扇主供水道、中扇朵叶体和分流河道,以及外扇席状砂。该类扇体相带划分类似于经典海底扇模式,高密度浊流首先形成稳定的主供水道,沉积物以粗粒沉积物为主,也是主要的砾石沉积相带。高密度浊流继续向前搬运,分流河道增多,且在河道两侧堆积形成小朵叶体。随着沉积物的增多,河道间的朵叶体逐渐堆积连接成片,形成复合的大型朵状,分流河道和朵叶体沉积以中-细砂岩为主。低密度浊流在朵叶体的侧缘和前缘形成薄层的席状砂。

3.3 花瓣扇

瓣状体地震反射特征表现为多组、中频、强振幅、亚平行反射的同相轴,连续性一般,瓣状体之间以低振幅泥岩为间隔(表1)。RMS属性平面形态表现为“类朵状”的瓣状形态(表1)。瓣状体测井相为齿化漏斗形(图4c),与朵叶体类似。

花瓣扇主要发育于LDA构造区,包括内扇主供水道、中扇瓣状体和分流河道,以及外扇席状砂。该类

扇体属于舌形扇与朵叶扇之间的过渡类型。瓣状体是由于河道间堆积的小朵叶体未连接成片造成的,其沉积相带特征与朵叶扇类似。沉积物粒度较朵叶扇要细一些,瓣状体以细砂岩和粉砂岩为主(图4c)。

3.4 河道扇

分流河道地震反射特征表现为中频、强振幅有一定外包络形态的透镜体,内部反射为同相轴连续一般、不平行的河道充填(表1)。RMS属性可见长条状河道形态和前端片状席状砂(表1)。分流河道沉积测井曲线表现为齿化箱形,早期河道沉积为粉砂质泥岩,后期被中-细砂岩充填,单组河道充填砂岩厚度为20 m左右(图4d)。

河道扇主要发育于LDC构造区,包括内扇主供水道、中扇分流水道,以及外扇席状砂。瓣状河三角洲前缘垮塌形成的高密度浊流在斜坡上形成稳定的主供水道,早期为细粒沉积充填,后期被粗粒沉积充填。高密度浊流继续搬运,水道轻微分叉形成分流水道,低密度浊流在分流水道末端沉积形成席状砂。

4 主控因素

研究区发育非河道型(舌形、朵叶形、花瓣形)及河道型的湖底扇沉积,针对湖底扇形态的研究对重力流砂体的预测与刻画具有重要的意义。综合研究区

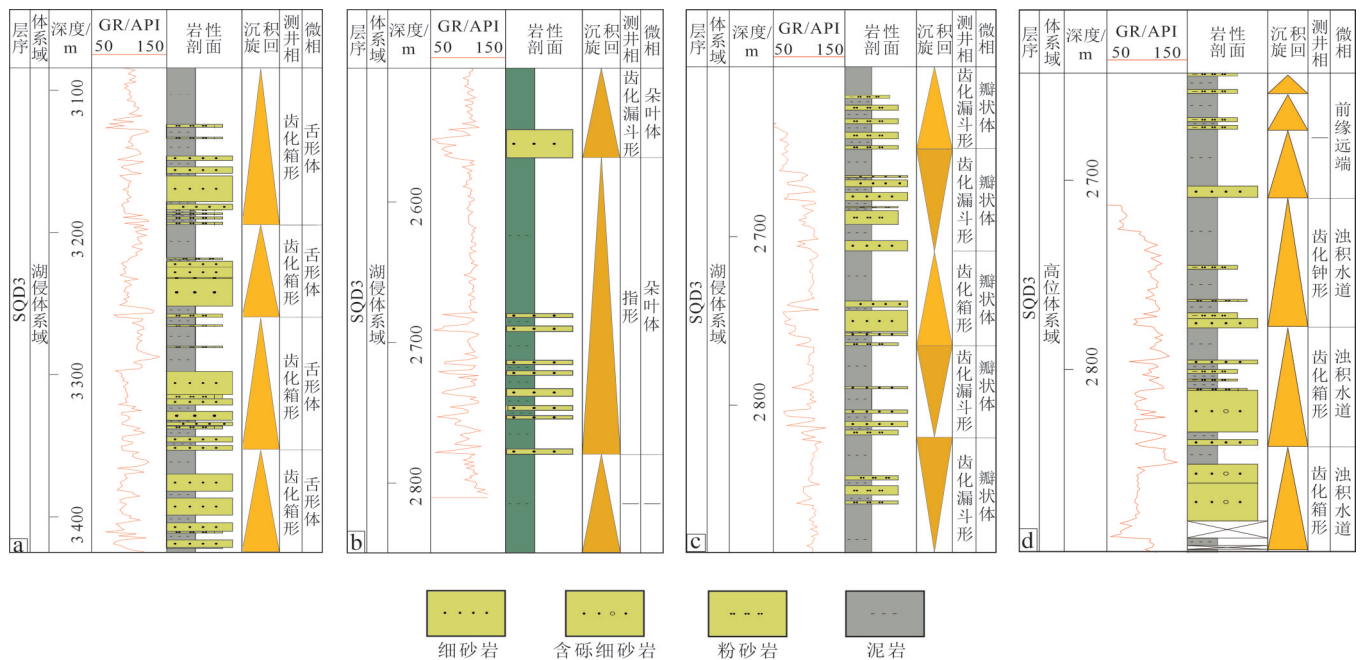


图4 辽东湾坳陷辽西凸起东斜坡典型井东三层序(SQD3)测井相特征

Fig. 4 Logging facies characteristics of the SQD3 of typical wells in the eastern slope of Liaoxi uplift, Liaodong Bay Depression

a. LDB-2井; b. JZA-1井; c. LDA-1井; d. LDC-2井

构造和沉积特征分析认为,斜坡的坡度及样式与物质来源(三角洲前缘的含砂性)联合控制了湖底扇的形态。

4.1 坡度

由于断裂系统发育,斜坡地貌发生了显著变化,造成LDB构造区坡度较其他构造区要大,坡度为 2.3° (图5b),富含砂质的高密度浊流在沿斜坡向下搬运的过程中,由于搬运速度较快,沉积作用发生的时间也短,更易形成长宽比大的舌形扇沉积。LDA构造区坡度为 1.1° (图5c),JZA构造区坡度为 0.8° (图5d),当坡度较缓时,富含砂质的高密度浊流不仅向下搬运,同时也侧向搬运堆积,更容易形成长宽比小的朵状体。恢复斜坡区古地貌对坡度测量至关重要。研究区在古近纪受构造活动影响,地貌起伏明显,差异沉降特征显著。对于东三层序(SQD3)不同体系域,采用断裂活动分析和沉积厚度拾取并举的方法,能够很好还原层序地层沉积前的相对古地貌(图5a,e)。坡度越陡,斜坡构造越复杂,重力流流动的速度越快,越快地在坡脚发生堆积,越不容易形成稳定的浊积水道,低密度的浊流继续向前搬运,在更远的位置沉积(图6)。

4.2 物源(三角洲前缘)性质

LDC构造区高部位高位体系域沉积时期发育辫状河三角洲前缘沉积,底部发育一套泥质粉砂岩的细粒沉积,上部发育中-细砂岩;斜坡区LDC-2井高位体系域发育湖底扇沉积,底部发育一套泥质粉砂岩的浊积

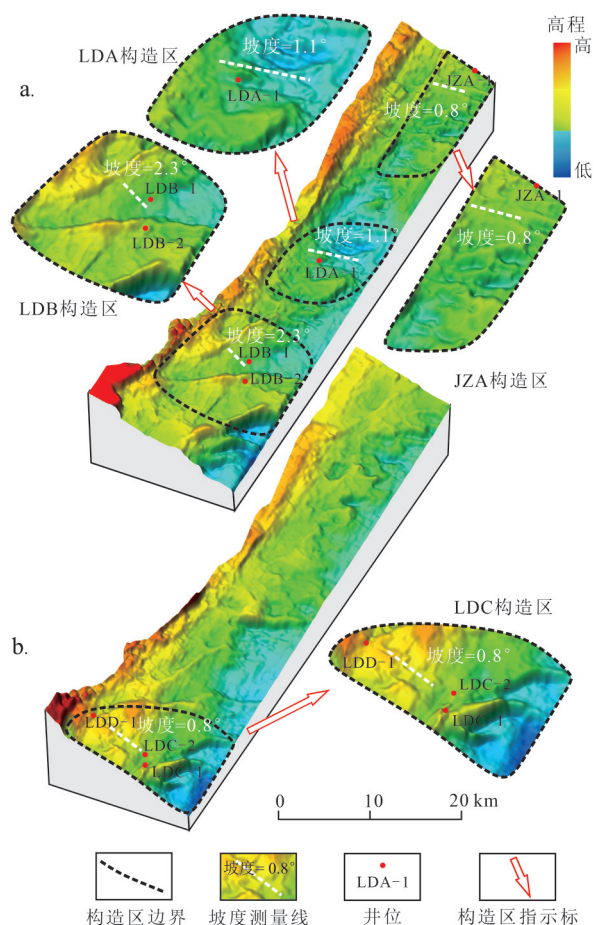


图5 辽东湾坳陷辽西凸起东斜坡东三层序(SQD3)湖侵和高位体系域古地貌特征

Fig. 5 Palaeogeomorphic maps of the lake transgressive systems tract (TST) and highstand systems tract (HST) in the SQD3 in the eastern slope of Liaoxi uplift, Liaodong Bay Depression
a. 湖侵体系域古地貌; b. 高位体系域古地貌

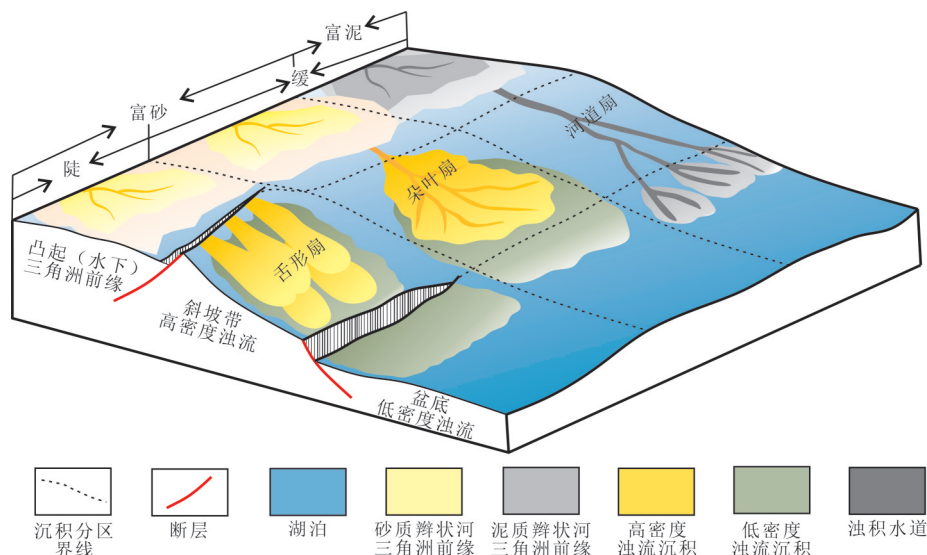


图6 辽东湾坳陷辽西凸起东斜坡湖底扇沉积模式

Fig. 6 Sedimentary model for the sublacustrine fan in the eastern slope zone of Liaoxi uplift, Liaodong Bay Depression

水道充填沉积,上部发育中-细砂岩。因此,早期富含泥质的高密度浊流首先对斜坡底形进行改造,形成了稳定、延伸较远的浊积水道,后期富含砂质的高密度浊流沿古浊积水道搬运沉积。LDC构造区高位体系域沉积时期古地貌坡度与JZA构造区湖侵体系域沉积时期古地貌坡度都为 0.8° (图5f),但物源富砂性的差异导致了湖底扇形态的迥异。JZA构造区缺乏泥质高密度浊流,因此湖底扇表现为朵叶状外形。含砂率越低,重力流对斜坡底形的侵蚀能力越强,越容易形成稳定的浊积水道。含砂率越高,重力流对堤岸系统的破坏能力越强,越容易发生分叉改道,并促进朵叶体的发育,形成连片的砂体(图6)。

因此复杂斜坡结合富砂物源,易形成非水道化的舌形扇;简单斜坡结合富砂物源,易形成朵叶扇;简单斜坡结合中等富砂物源,易形成过渡型花瓣扇;简单斜坡结合贫砂物源,易形成水道化湖底扇。

5 结论

1) 辽西凸起东部缓坡带(辽中凹陷西斜坡)东三层序(SQD3)层序沉积时期发育高密度浊流性质的重力流沉积,沉积物分选较好,继承了三角洲前缘较高的结构成熟度。

2) 辽西凸起东部缓坡带湖底扇沉积主要发育于东三层序(SQD3)湖侵体系域内,随着相对湖平面的上升,物源供给充足的辫状河三角洲前缘沉积超覆于辽西凸起(水下)及斜坡近端,斜坡带断裂活动容易造成辫状河三角洲前缘砂体垮塌,形成重力流。

3) 辽西凸起东部缓坡带湖底扇沉积形态有4种类型:长舌形、朵叶状、瓣状及河道型。斜坡坡度及物源(三角洲前缘)富砂性控制了湖底扇的形态。坡度越陡,扇体的长宽比越大,湖底扇表现为长舌形;坡度越缓,湖底扇表现为朵叶形。物源(三角洲前缘)富砂程度越高,河道的稳定性越差,越容易形成朵叶体;而泥质含量越高,河道越长越稳定。

参 考 文 献

- [1] Bouma A H. Sedimentology of some flysh deposits: A graphic approach to facies interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 168.
- [2] Shanmugam G, Moiola R J. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(3): 672-695.
- [3] 张兴阳, 罗顺社, 何幼斌. 沉积物重力流-深水牵引流沉积组合—鲍玛序列多解性探讨[J]. 石油天然气学报, 2001, 23(1): 1-4.
- [4] Zhang Xinyang, Luo Shunshe, He Youbin. Deposit assemblage of gravity flow and traction current in deep water —A study of the multiple interpretation of the Bouma Sequence [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2001, 23(1): 1-4.
- [5] Lowe D R. Sediment gravity flow: Their classification and some problems of application to natural flows and deposits [M]. Paleont: Geology of Continental Slopes, 1979: 75-82.
- [6] Lowe D R. Sediment gravity flows: (II) Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. Journal of Sedimentary Research, 1982, 52(1): 279-297.
- [7] Normark W R. Growth patterns of deep-sea fans [J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(11): 2170-2195.
- [8] Normark W R. Fan valleys, channels, and depositional lobes on modern submarine fans: Characters for recognition of sandy turbidite environments [J]. AAPG Bulletin, 1978, 61(6): 912-931.
- [9] Mutti E, Ricci Lucchi F. Turbidites of the northern Apennines: Introduction to facies analysis [J]. International Geology Review, 1972, 20(2): 125-166.
- [10] Walker R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: Models for exploration for stratigraphic traps [J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(6): 932-966.
- [11] Shanmugam G. Discussion of He et al. (2011, Geo-Marine Letters): Evidence of internal-wave and internal-tide deposits in the Middle Ordovician Xujiawan Formation of the Xiangshan Group, Ningxia, China [J]. Geo-Marine Letters, 2012, 32(4): 359-366.
- [12] Shanmugam G. Process-sedimentological challenges in distinguishing paleo-tsunami deposits [J]. Natural Hazards, 2012, 63(1): 5-30.
- [13] Richards M T. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(5): 792-822.
- [14] Richards M T, Bowman M. Submarine fans and related depositional systems: (ii) Variability in reservoir architecture and wireline log character [J]. Marine & Petroleum Geology, 1998, 15(8): 821-839.
- [15] Richard M, Bowman M, Reading H. Submarine-fan systems: (i) Characterization and stratigraphic prediction [J]. Marine and Petroleum Geology, 1998, 15(7): 711-717.
- [16] 郭涛, 王军, 石文龙, 等. 辽西低凸起中南段古近系东营组层序地层及地层-岩性油气藏勘探意义 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 248-255, 264.
- [17] Guo Tao, Wang Jun, Shi Wenlong, et al. Sequence stratigraphy of the Paleogene Dongying Formation and its significance for stratigraphic-lithologic reservoirs exploration in the central-south Liaoxi salient [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 248-255, 264.
- [18] 陈维涛, 杜家元, 龙更生, 等. 珠江口盆地惠州地区珠江组控砂机制及地层-岩性圈闭发育模式 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(3): 449-458.
- [19] Chen Weitao, Du Jiayuan, Long Gengsheng, et al. Factors controlling sandbody development and models of stratigraphic-litho-

- logic traps of Zhujiang Formation in Huizhou area, Pearl River Mouth Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(3): 449-458.
- [17] 刘君荣, 王晓文, 赵忠新, 等. 南堡凹陷拾场次洼的构造-沉积特征及其对岩性油藏勘探的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 601-608.
- Liu Junrong, Wang Xiaowen, Zhao Zhongxin, et al. Tectonic-sedimentary characteristics and their influences on the forming of lithologic hydrocarbon reservoirs in the Shichang Subsag of the Nanpu Sag [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 601-608.
- [18] 杨海风, 徐长贵, 牛成民, 等. 渤海湾盆地黄河口凹陷新近系油气富集模式与成藏主控因素定量评价[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(2): 259-269.
- Yang Haifeng, Xu Changgui, Niu Chengmin, et al. Quantitative evaluation of hydrocarbon accumulation pattern and the controlling factors in the Neogene of Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(2): 259-269.
- [19] 冯志强, 张顺, 解习农, 等. 松辽盆地嫩江组大型陆相拗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, 1240.
- 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, 1240.
- [20] 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 Yanchang Formation, Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2009, 21(4): 19-21.
- [21] 张雷, 李振华, 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*, 2015, 39(1): 17-24.
- [22] 周新平, 何青, 刘江艳, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段深水碎屑流沉积特征及成因[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1063-1078.
- Zhou Xinping, He Qing, Liu Jiangyan, et al. Features and origin of deep-water debris flow deposits in the Triassic Chang 7 Member, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1063-1078.
- [23] 陈朝兵, 赵振宇, 付玲, 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组6段深水致密砂岩填隙物特征及对储层发育的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(5): 1098-1111.
- Chen Chaobing, Zhao Zhenyu, Fu Ling, et al. Interstitial matter and its impact on reservoir development in Chang 6 deepwater tight sandstone in Huaqing area, Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(5): 1098-1111.
- [24] 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(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(9): 3287-3299.
- [25] 李虹, 张新涛, 郭涛, 等. 渤海海南斜坡带东二下段湖底扇沉积特征、微相分布及相模式[J]. *中国海上油气*, 2020, 32(5): 54-62.
- Li Hong, Zhang Xintao, Guo Tao, et al. Sedimentary characteristics, microfacies distribution and facies model of the sublacustrine fan in $E_3d^{2(L)}$ of the Shinan slope zone of Bohai sea [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2020, 32(5): 54-62.
- [26] 刘艺萌, 张葵, 黄晓波, 等. 辽中凹陷北洼古近系东二下亚段湖底扇沉积类型及时空演化机理分析[J]. *沉积学报*, 2019, 37(6): 1280-1295.
- Liu Yimeng, Zhang Li, Huang Xiaobo, et al. Sedimentary types and genetic mechanism of the space-time evolution of sublacustrine fans of the Paleogene in lower E_d^2 Formation, Northern Sub-sag of the Liaozhong Sag [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2019, 37(6): 1280-1295.
- [27] 宋明水, 茆书巍, 林会喜, 等. 断陷湖盆湖底扇砂岩体沉积特征及主控因素分析——以东营凹陷民丰地区沙三段中亚段为例[J]. *油气地质与采收率*, 2021, 28(3): 1-13.
- Song Mingshui, Mao Shuwei, Lin Huixi, et al. Sedimentary characteristics and controlling factors of sublacustrine fan sand bodies in faulted basin: A case study of Middle E_s^3 in Minfeng area, Dongying Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2021, 28(3): 1-13.
- [28] 胡德胜, 范彩伟, 朱红涛, 等. 涪西南凹陷流一段高位体系域湖底扇沉积特征及勘探意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(5): 23-31.
- Hu Desheng, Fan Caiwei, Zhu Hongtao, et al. Sedimentary characteristics and exploration significance of sub-lacustrine fan of highstand systems tract in the first member of Liushagang Formation in the Weixinan Sag [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(5): 23-31.
- [29] 漆家福, 陈发景. 辽东湾-下辽河裂陷盆地的构造样式[J]. *石油与天然气地质*, 1992, 13(3): 272-283.
- Qi Jiafu, Chen Fajing. Structural style in Liaodongwan-Xialiaohe Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 1992, 13(3): 272-283.
- [30] 夏庆龙, 田立新, 周心怀, 等. 渤海海域构造形成演化与变形机制[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 27-56.
- Xia Qinglong, Tian Lixin, Zhou Xinhuai, et al. The formation and evolution and deformation mechanism of the Paleogene of Bohai Sea [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 27-56.

(编辑 张 晟)