

文章编号: 1671-1505(2024)04-0816-18 DOI:10.7605/gdtxb.2024.04.050

断陷湖盆陡坡带早期斜向扇三角洲形成机制、发育规律及勘探启示：以东营凹陷北带为例*

李 晋¹ 刘 震² 张忠民¹ 刘建平³ 孙笑凡² 刘惠民⁴
杨 光⁵ 朱茂林² 王文彬⁵ 肖 洪²

1 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆 401331

4 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257015

5 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015

摘要 断陷湖盆作为全球最重要的含油气盆地类型之一, 在盆地早期的充填演化过程中, 其陡坡带往往能够形成厚达上千米的砂砾岩沉积建造, 成为油气勘探的重要领域。目前对这些巨厚层砂砾岩的沉积成因认识仍存在较多的争议。本次研究以济阳拗陷典型的断陷湖盆——东营凹陷陡坡带盐家地区为例, 基于高分辨率三维地震数据体、岩心、录井、测井等地质资料, 综合运用地震地层学、构造地质学、沉积学和流变学分析方法, 对前期在断陷湖盆陡坡带早期发现的斜向扇三角洲的发育特征及其形成演化机制进行了研究, 取得了以下主要认识: (1) 斜向扇三角洲沉积物中砾石含量相对较高, 由牵引流和重力流共同形成, 石英含量平均 40%~55%, 发育扇三角洲平原、扇三角洲前缘和前扇三角洲亚相, 其地震响应特征在顺物源方向表现为(斜交、叠瓦和帚状)前积相, 在垂直物源方向表现为充填相; (2) 斜向扇三角洲主要发育于断陷早期, 并于断陷中期大量消亡, 扇体与边界断层以低角度斜交, 角度通常不会超过 45°, 扇体的发育规模受到其根部所处位置的影响, 扇体的消亡呈非等时性; (3) 断陷湖盆陡坡带早期大型斜向扇三角洲的形成演化主要受控于 4 个因素: 边界断层分段特征形成的转换构造为斜向扇三角洲的发育提供输送通道, 断陷早期边界断层控制下的古凹槽为斜向扇三角洲的发育提供可容纳空间, 断块间相互作用形成的破碎带为斜向扇三角洲的发育提供物质来源以及边界断层的硬连接导致斜向扇三角洲的消亡并向近岸水下扇转换; (4) 已发现断陷湖盆陡坡带深层砂砾岩油气藏多属于斜向扇三角洲。本次研究指出陡坡带各级别转换带可作为勘探的重点靶区, 布井方向应沿斜交边界断层。本研究不仅丰富了断陷湖盆陡坡带沉积理论, 同时能够为中国陆相断陷盆地深层勘探提供新的思路和理论依据。

关键词 断陷湖盆陡坡带 斜向扇三角洲 演化 展布特征 深层油气 东营凹陷

第一作者简介 李晋, 男, 1992 年生, 工程师, 主要研究方向为构造沉积学、深水沉积及碳酸盐岩沉积储集层。E-mail: lijn.syky@sinopec.com。

通讯作者简介 刘震, 男, 1963 年生, 1984 年获西北大学学士学位, 1990 年获石油大学(北京)博士学位, 现为中国石油大学(北京)地球科学学院教授, 博士生导师, 主要从事石油地质学基础及应用研究。E-mail: liuzhenjr@163.com。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(编号: 42302185)和中国博士后科学基金面上项目(编号: 2023M743884)联合资助。[Co-funded by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (No. 42302185) and the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2023M743884)]

收稿日期: 2023-07-21 改回日期: 2023-09-20

Formation mechanism, development regularity and exploration implication of oblique fan delta in steep slope zone of rift lacustrine basin in the early stage of rifting: a case from northern belt of Dongying sag

LI Jin¹ LIU Zhen² ZHANG Zhongmin¹ LIU Jianping³ SUN Xiaofan² LIU Huimin⁴
YANG Guang⁵ ZHU Maolin² WANG Wenbin⁵ XIAO Hong²

¹ *Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing 100083, China*

² *College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

³ *School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China*

⁴ *Shengli Oilfield Company, Sinopec, Shandong Dongying 257015, China*

⁵ *Petroleum Exploration and Production Research Institute, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Shandong Dongying 257015, China*

Abstract As one of the most important types of oil and gas basins in the world, the rift lacustrine basin can often form glutenite sedimentary formations with a thickness of thousands of meters in the early stage of filling and evolution process, which has become an important field of oil and gas exploration. However, there are still many controversies regarding the sedimentary genesis of this extremely thick glutenite. In this study, Yanjia area in the steep slope zone of the Dongying sag, a typical rift lacustrine basin in Jiyang Depression, is selected as an example. Utilizing high-resolution 3D seismic data, core samples, logging, and well logging, we conduct a systematic analysis of the glutenite sedimentary formations in the steep slope zone during the early rifting stage. This study applies seismic stratigraphy, structural geology, sedimentology, and rheology analysis methods comprehensively. The following understandings have been obtained: (1) The gravel content in the sediments of oblique fan delta is relatively high, which is formed by traction flow and gravity flow. The average quartz content is about 40%–55%. Fan delta plain, fan delta front and pre-fan delta subfacies are developed. The seismic response characteristics include (oblique, imbricate and broom-shaped) progradation facies along the direction of sediment source, and filling facies perpendicular to the sediment source direction. (2) The oblique fan delta mainly developed in the early stage of rifting, and disappeared in the middle stage of rifting. The fan and the boundary fault are obliquely intersected at a low angle, typically not exceeding than 45°. The development scale of the fan is affected by the location of its root, and its disappearance is not isochronous. (3) A new mechanism for the formation of the large-scale oblique fan delta in the steep slope zone of the rift lacustrine basin during the early stage of rifting is proposed. Relay structures related to the segmentation characteristics of boundary faults provide transport conduits for the development of oblique fan deltas. The paleo-troughs controlled by the boundary fault activity provide new accommodation for the development of oblique fan deltas during the early stage of rifting. The fracture zone formed by the interaction between faulted blocks provide material basis for the development of oblique fan deltas, and the connection of the faulted block leads to the disappearance of the oblique fan delta and the transformation to the nearshore subaqueous fan. (4) It has been found that most of the deep glutenite reservoirs in the steep slope zone of the rift lacustrine basin belong to the oblique fan deltas. This study points out that the relay zones at all levels in the steep slope zone can be key target areas for exploration, and the well layout direction follow the oblique boundary fault. This study not only enriches the sedimentary theory of steep slope zone in rift lacustrine basin, but

also provided a new idea and theoretical basis for deep petroleum exploration of the continental rift lacustrine basin in China.

Key words steep slope zone of rift lacustrine basin, oblique fan delta, evolutionary, distribution feature, deep petroleum exploration, Dongying sag

About the first author LI Jin, born in 1992, is a geologist. His research interests focus on tectonostratigraphy, deep-water sedimentation and carbonate reservoir geology. E-mail: lijn.syky@sinopec.com.

About the corresponding author LIU Zhen, born in 1963. He earned a B.S. degree from Northwest University in China in 1984 and a Ph.D. degree from China University of Petroleum (Beijing) in 1990. He is currently a professor in College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing). His research interest focuses on fundamental and applied petroleum geology. E-mail: liuzhenjr@163.com.

断陷湖盆在全球范围内分布广泛, 是最为重要的含油气盆地之一。据不完全统计, 断陷湖盆的油气资源占全球总油气资源的三分之一 (Mann, 2007)。伴随盆地早期构造活动及充填演化, 其陡坡带往往能够形成厚达上千米的砂砾岩沉积建造, 成为油气勘探的重要领域。长期以来, 关于断陷湖盆陡坡带早期砂砾岩的成因认识一直成为沉积学领域的一大热点和难点, 并受到广泛关注, 特别是近 20 年来, 伴随着国际上再次兴起的重力流研究热潮以及多种新观点的涌现, 给断陷湖盆陡坡带早期砂砾岩的成因认识带来了更多潜在的可能性。前人研究认为, 在断陷早期砂砾岩主要为短轴物源 (垂直于边界断层方向) 形成的近岸水下扇, 沉积物搬运通道主要为古冲沟, 所形成的近岸水下扇呈垂直陡坡带断层边界展布, 可形成连片大范围的陡坡扇群 (张功成和刘震, 2014; Cao *et al.*, 2018, 2021; 邱隆伟等, 2021; Yang *et al.*, 2023)。扇体的成因流体可能为洪水作用下的异重流和碎屑流等重力流性质的流体类型, 认为洪水作用对形成陡坡带巨厚砂砾岩体产生了至关重要的作用 (Cao *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2020, 2022), 并建立了不同边界断层坡度、不同异重流成因下的近岸水下扇沉积模式 (白立科等, 2020; 于景强和韩宏伟, 2020; 邱隆伟等, 2021)。

然而, 当前对断陷湖盆陡坡带早期复杂的构造演化过程与沉积充填演化之间的联系并未得到系统的揭示。前人研究更多的是从沉积学的角度对陡坡带砂砾岩体进行解剖, 未充分考虑到断陷湖盆陡坡带早期控盆断裂的活动特性及其给古地貌格局 (Larsen, 1988; Morley, 1988; Morley *et al.*, 1990;

Walsh and Watterson, 1991; Peacock and Sanderson, 1994)、沉积充填演化及沉积展布特征带来的影响 (Morley *et al.*, 1990; Schlische, 1995; Commins *et al.*, 2005; Giba *et al.*, 2012)。通过对陡坡带长岩心段观察发现, 在深水环境中砂砾岩体往往具有整套巨厚砂体的特征 (厚度可达几千米), 砂体较为连续, 缺乏厚层的深黑色泥岩分隔, 在地质历史时期, 仅仅依靠事件性或者季节性的洪水作用能否形成连续厚达数千米、横向延伸数百千米的陡坡带砂砾岩体尚有待深入研究。而且, 水槽实验中近岸水下扇在顺物源方向呈楔形体, 沉积物中砾砂比远远大于 1, 而实际上在陡坡带所看到的楔形体为多期扇体退积而形成的, 并非为单期次扇体的形态, 沉积物中砂岩含量高, 砾砂比远远小于 1, 这一实际现象与水槽实验扇体结构难以吻合。此外, 通过 20 余年的勘探实践表明, 断陷湖盆陡坡带深层砂砾岩储集层的微观结构和宏观分布均具有极强非均质性, 其形成过程及发育控制机理仍不明确, 导致优质砂砾岩储集层预测难度大, 严重阻碍了油气的高效勘探开发。

笔者基于前期多个地区断陷早期陡坡带沉积模式的解剖, 发现断陷湖盆陡坡带早期巨厚砂砾岩体并非为垂直于边界断层的近岸水下扇沉积形成, 而主要为斜交于边界断层发育的扇三角洲沉积, 并进一步提出了“斜向扇三角洲”的科学术语 (刘震等, 2022)。这类扇三角洲最典型的特征是扇体延展方向以低角度 (小于 45°) 斜交于边界断层, 其发育受控于断陷早期边界断层的拼接演化, 而扇体的相带划分及其特征与扇三角洲沉积模式一致。这一现象的发现为断陷湖盆陡坡带沉积格局、演化模

式及深层油气勘探提供了新的思路。在团队前期研究发现的基础上，本次研究聚焦于斜向扇三角洲在陡坡带的形成机制及其分布规律，以渤海湾盆地东营凹陷北带东段为例，开展了斜向扇三角洲的系统解剖。希望通过本次研究，进一步揭示断陷湖盆陡坡带早期斜向扇三角洲的发育模式，为中国东部及海外陆相断陷湖盆陡坡带砂砾岩体油气勘探提供新的思路和理论支持。

1 地质概况

济阳拗陷位于渤海湾盆地东南部，整体呈近东西向展布，北起埕宁凸起，南接鲁西断层，东西窄，中部宽。其中东营凹陷作为济阳拗陷中的次一级构造单元，北部紧邻陈家庄凸起，发育陈南断层，南部连接鲁西隆起及广饶凸起，以齐河—广饶断裂为界，西起滨县凸起，东至青坨子凸起，是发育于太古界基底之上的具有“北断南超”的典型断陷湖盆(图 1)。

东营凹陷在古近纪经过 1 期完整的裂陷活动，裂陷演化进一步可分为 3 个时期，即裂陷活动初始阶段(断陷早期)、裂陷活动鼎盛阶段(断陷中期)和裂陷活动消亡阶段(断陷末期)。断陷早期主要介于 65~42.0 Ma 之间，强烈的断裂作用使得先期形成边界断层(陈南断层)再活化，形成大型半地堑，并沉积了孔店组和沙四段 2 套地层。本次研究的层段是沙四段，主要岩性为 1 套砂砾岩，累计厚度可达 2000 m(图 1)。

2 斜向扇三角洲的发育模式

本次研究利用高分辨率三维地震数据体、岩心、测录井等资料，分析了斜向扇三角洲的沉积及地震响应特征，并在此基础上对其时空展布特征进行了阐述。

2.1 斜向扇三角洲的沉积特征

斜向扇三角洲沉积物中砾石含量整体较高，根据剥蚀区水系的长短，沉积物的粒度会有一定的差异，搬运距离相对较长的沉积物中砂岩主要以细砂岩为主，搬运距离相对较短的沉积物中砂岩主要以粗砂岩为主。沉积物中成分成熟度相比于近岸水下扇较高，经过相对长距离搬运的斜向扇三角洲中石

英含量平均约 55%，经过相对短距离搬运的斜向扇三角洲中石英含量平均约 40%。

斜向扇三角洲发育扇三角洲平原、扇三角洲前缘和前扇三角洲亚相(图 2)。扇三角洲平原主要发育分流河道、砾质漫滩和泥石流微相。分流河道沉积主要为河流沉积，发育灰绿色中砾岩、细砾岩或者砾质中砂岩，整体表现为自下而上的正递变层理，发育叠瓦构造、波状层理(图 2-a)。砾质漫滩主要为河流在洪汛期形成的溢岸沉积，主要发育灰绿色细砾岩和含砾粗砂岩或灰绿色含砾细一中砂岩，整体表现为自下而上的反递变层理结构，可见叠瓦构造、弱平行层理，通常与分流河道沉积构成河流的二元结构。泥石流主要为山洪爆发形成的黏滞性流体，主要发育灰绿色中砾岩或细砾岩或灰绿色含砾细一中砂岩，整体表现为块状结构，无韵律特征，为砾质碎屑流(图 2-b)。

扇三角洲前缘主要发育水下分流河道、水下分流河道间、河口坝、泥石流和席状砂沉积微相。水下分流河道主要为扇三角洲平原分流河道的水下延伸部分，为牵引流沉积，主要发育浅褐色砾质砂岩和含砾砂岩，砂岩以粗砂岩或中砂岩为主，结构成熟度相对较高，整体表现为自下而上的正递变层理，发育叠瓦构造、波状交错层理和波状层理(图 2-c)。水下分流河道间为河流洪汛期形成的水下漫溢沉积，区别于砾质漫滩，水下分流河道间形成由砾质砂岩和含砾砂岩组成的反—正复合递变层理，说明流体具备增强与衰减 2 个完整的半旋回，在半旋回的拐点处达到流量峰值，其流量变化表现为渐变式(图 2-d)。河口坝主要为河流的河口段，由于水流特征的变化以致沉积物在主流线附近形成围住河口的弧形堆积体，主要由砾质砂岩和含砾砂岩构成，砂岩为粗砂岩或中细砂岩，整体表现为自下而上的反递变层理，发育平行层理和叠瓦构造(图 2-e)。河口坝的这种反韵律相对较少，这种现象有 2 种解释，一种是由于陡坡带坡度较大，距离物源区较近，导致河流的浓度和动能相对较高，流体中重力流所占比例相对较高，不易形成河口坝；另一种是陡坡带流体入湖后的摆动破坏了先前形成的沙坝。水下泥石流沉积为扇三角洲平原泥石流沉积的水下部分。区别于陆上部分，水下泥石流的粒度相对较细，主要由砾质砂岩和含砾砂岩构成，整体表现为块状构造和反递变层理(图 2-f)，这种

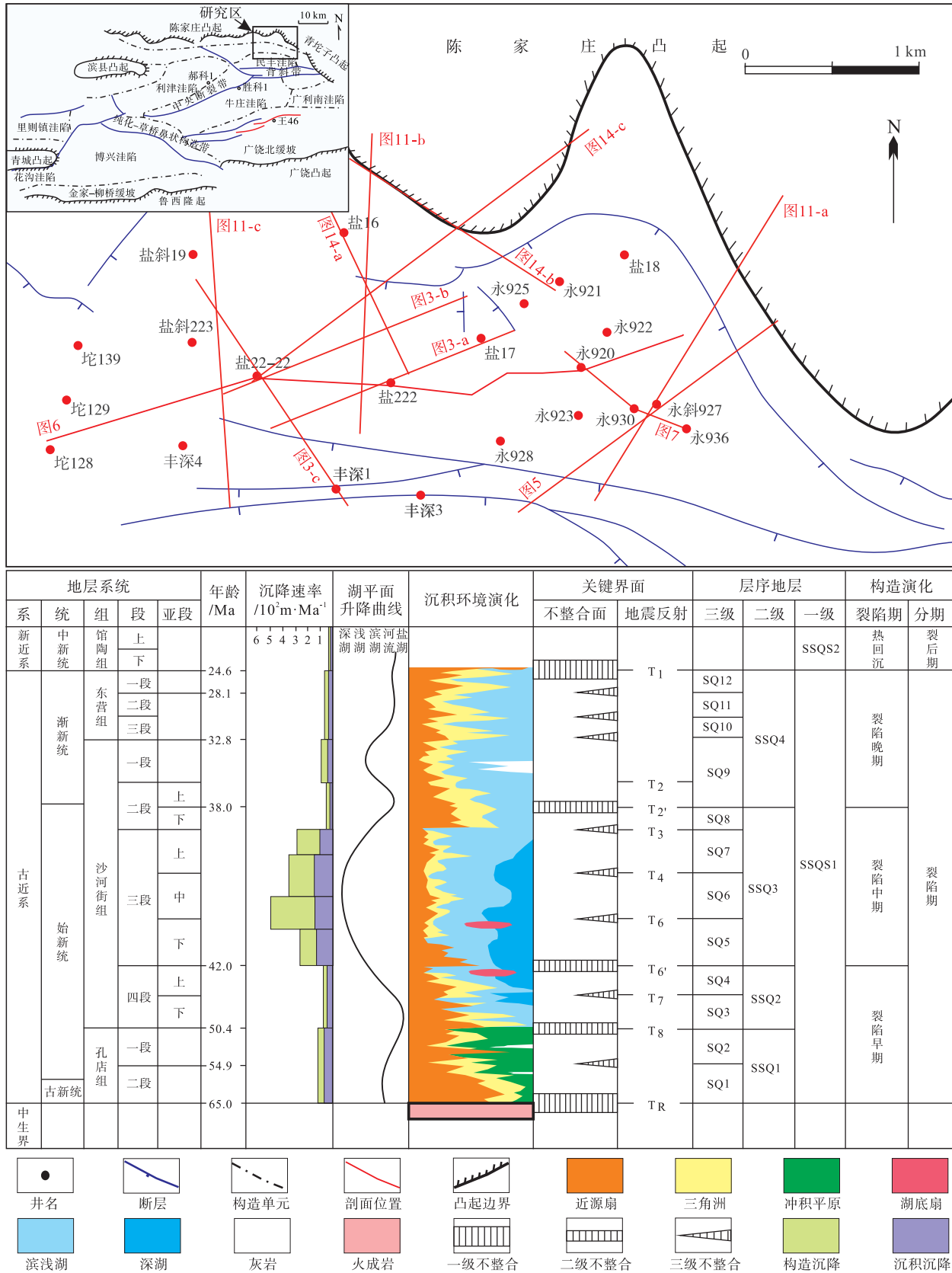
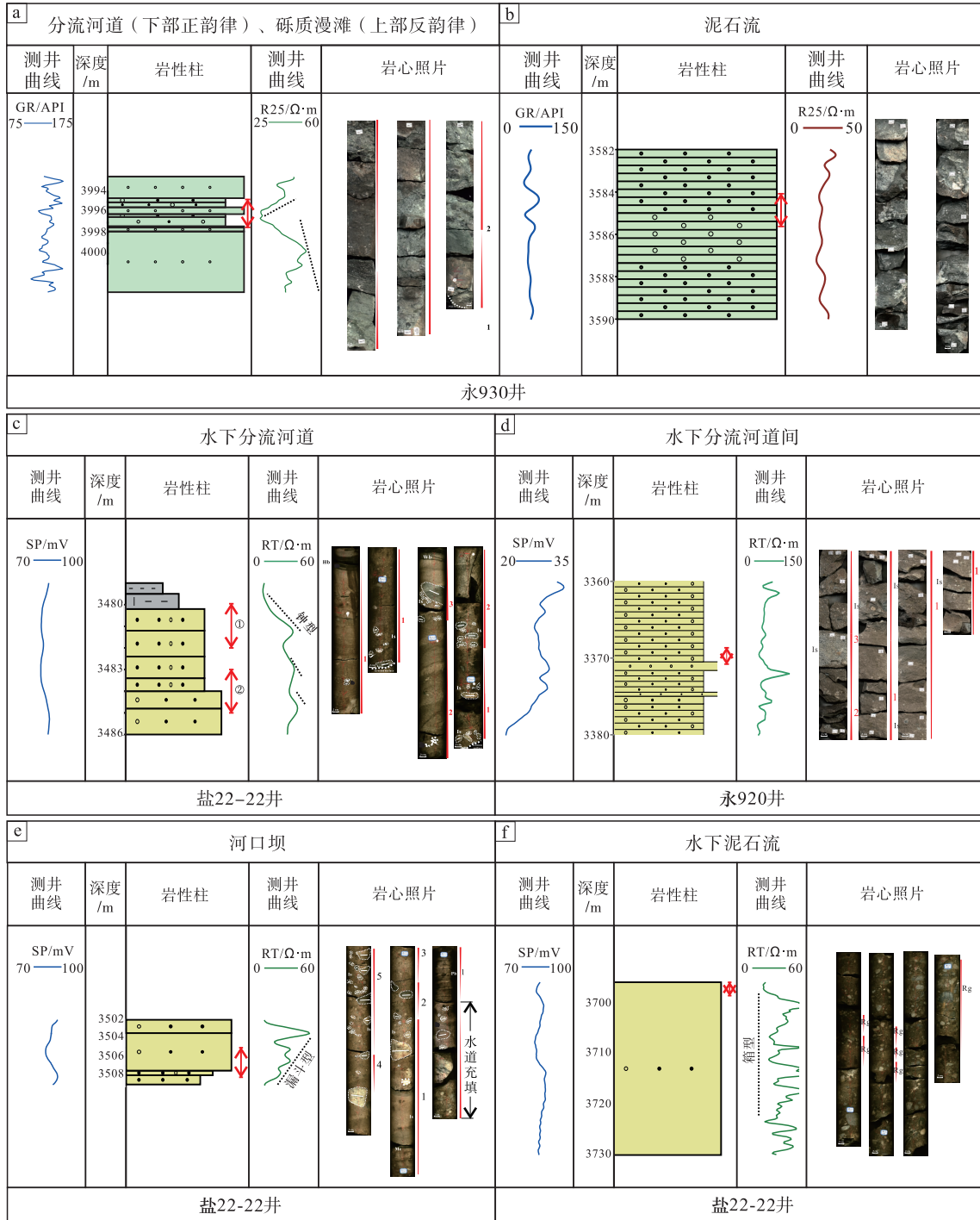


图 1 东营凹陷盐家地区平面位置与地层综合柱状图

Fig. 1 Location and comprehensive column of the Yanjia area in Dongying sag



泥岩 砂质泥岩 砾质砂岩 含砾砂岩 砂质砾岩 中-细砾岩 粗砾岩 细砾岩 | 3 旋回数 Rg 反递变层理 Is 叠瓦构造

a 和 b—斜向扇三角洲平原亚相，沙四上纯上亚段；c 和 d—斜向扇三角洲前缘亚相，沙四上纯上亚段；e 和 f—斜向扇三角洲前缘亚相，沙四上纯下亚段。hb 为水平层理；pb 为平行层理；Mc 为泥岩碎屑；红色箭头代表岩心取心位置

图 2 东营凹陷陡坡带斜向扇三角洲沉积微相特征

Fig. 2 Characteristics of sedimentary microfacies in oblique fan delta in the steep slope zone of Dongying sag

反递变是流体前部的弱剪切作用或者动力筛以及上浮力的作用形成的。说明砾质碎屑流在被稀释成砂

质碎屑流的时候，流体能力减弱，反韵律更容易被保存下来。席状砂沉积主要由泥质粉砂岩和粉砂质

泥岩或粗砂岩和中砂岩,整体表现为厚层砂岩夹薄层泥岩,通常发育水平层理、波状交错层理和波状层理。

前扇三角洲主要以泥岩和粉砂岩为主,整体表现为泥岩层和粉砂岩层之间的互层沉积,粉砂岩层通常较薄,泥岩层较厚。

2.2 斜向扇三角洲的地震响应

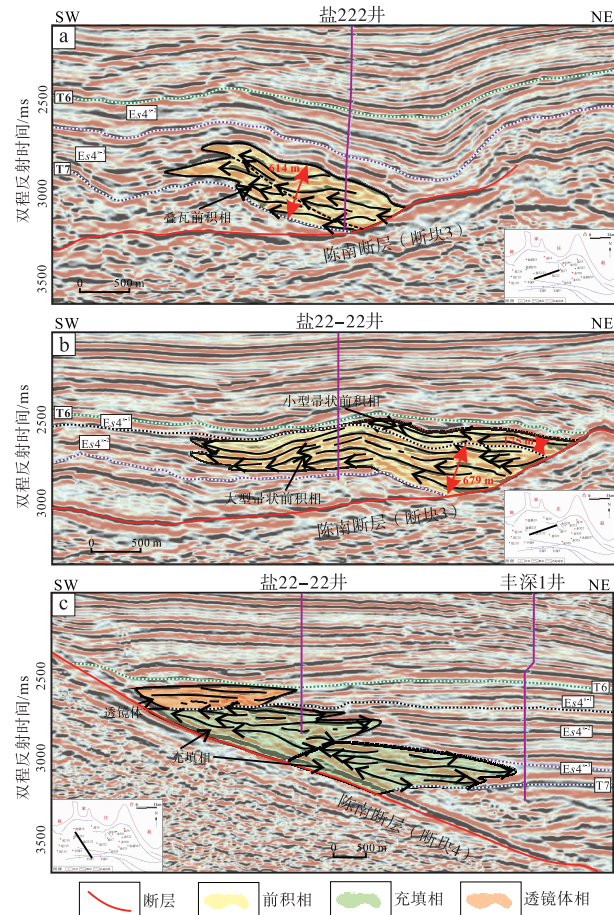
斜向扇三角洲的地震相及地震属性特征主要表现为前积—充填组合地震相,即在顺物源方向表现为大型前积相,常见斜交前积相、叠瓦前积相和帚状前积相3类(图3)。前积相是由一系列极低角度的前积地震反射同相轴组成,厚度较薄,以视顶超和视下超方式终止,具有中—强振幅、中等频率和中等连续反射特征(图3-a,3-b)。在地震剖面上表现出上超一整一关系。上超主要是由于受后期构造活动的影响,原始沉积地层发生翘倾。前积体厚度较大,延伸距离相对较远。在垂直物源方向表现为顶平底凹的充填相。具有中—强振幅、中—高频率、较好连续的特点(图3-c)。内部反射轴近似平行,向两侧双向上超。

利用岩心和录井资料对地震属性敏感性分析得出,均方根振幅属性对研究区岩性敏感度最高,强振幅(黄色、红色)反映为砾岩和砂岩,弱振幅(黑色、蓝色)为泥岩(图4)。斜向扇三角洲地震属性中表现为强振幅异常特征。平面上,强振幅常连片发育,中间可被弱振幅分隔。

2.3 斜向扇三角洲的空间展布

沙四下亚段沉积时期,构造调节带处(陈南断层东西段分界处)发育斜向扇三角洲。扇体呈近东西向展布,根部位于陈南断层东西段中间转换带。扇体延伸距离远,约6 km,扇体距离陈南断层有一定的距离。断块2和断块3、断块3和断块4之间发育小型扇三角洲,扇体斜交于边界断层。断块间发育的为小型扇三角洲,紧邻断块处为近岸水下扇(图4-b)。

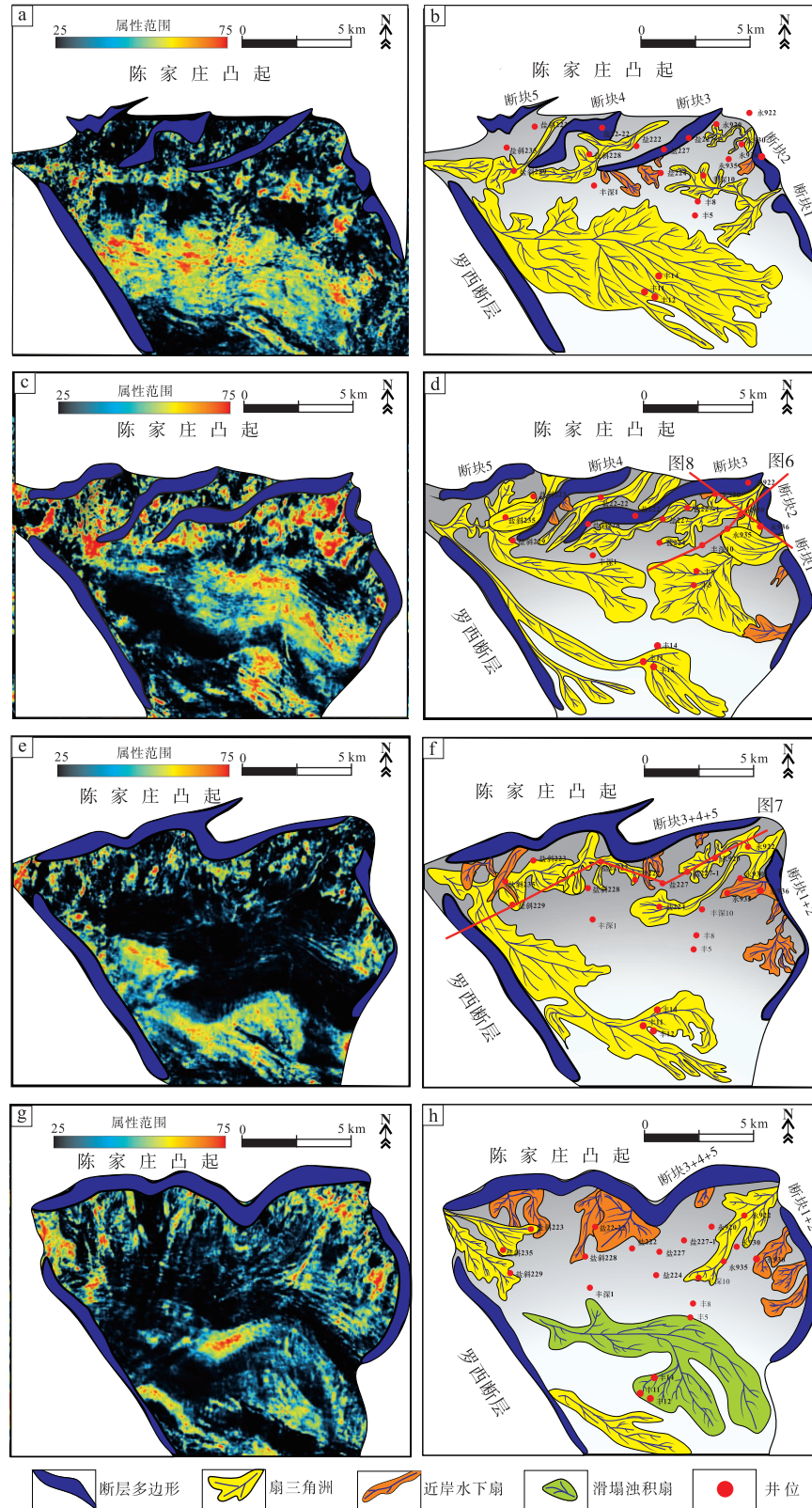
至沙四上亚段沉积早期,东营凹陷北带东段西侧发育继承性三角洲,扇体分为3个朵体(图4-d),靠近断块的朵体,扇体呈近东西向展布,在洼槽带的深水区扇体呈北西—南东向展布。此外,在断块间还发育扇三角洲,断块1和断块2之间的扇体发育规模相对较大,呈不规则朵叶体,扇体向



a—叠瓦前积相; b—帚状前积相; c—充填相
图3 东营凹陷陡坡带前积—充填地震相图
(据 Li *et al.*, 2021; 有修改)

Fig. 3 Progradational-filled seismic facie in steep slope zone of Dongying sag (modified from Li *et al.*, 2021)

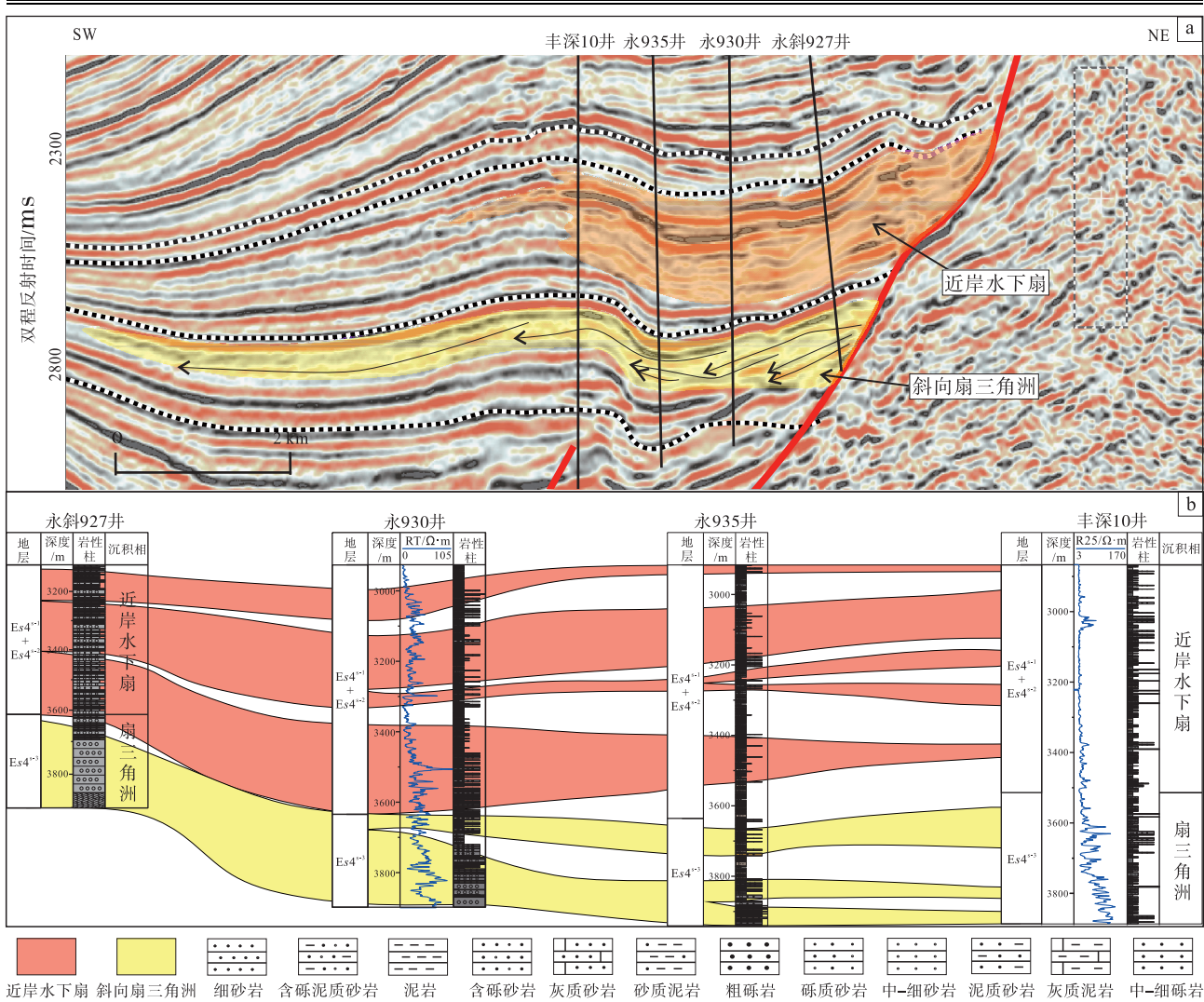
南西向延伸约5.7 km,向北西和南东向延展约2.3 km。在顺物源地震剖面中表现为小型帚状前积相(图5-a),扇体由根部向主体沉积物粒径逐渐变小,砂岩含量增高,向前端表现薄砂层和厚层泥岩互层(图5-b)。在垂直物源方向,扇体表现为充填相,与悬挂于边界断层的斜向杂乱相中间发育强振幅平行相(图6-a),说明扇三角洲与断块3处的近岸水下扇之间发育泥岩分隔带。充填相主体表现为厚层含砾砂岩;向边缘,厚层砂体中发育薄的泥岩隔层,此外,顶部发育厚层泥岩(图6-b)。断块3和断块4之间扇三角洲规模相对较小,扇体呈不规则朵叶体,向南西向延伸约1.4 km,向北西和南东向延展约1.7 km。在顺物源方向地震剖面上,表现为叠瓦状前积相(图3-b),在垂直物源方向地震剖面上,表现为充填相(图3-c)。断



a 和 b—沙四下亚段沉积时期地震属性和沉积相展布特征；c 和 d—沙四上亚段早期沉积时期地震属性和沉积相展布特征；e 和 f—沙四上亚段中期沉积时期地震属性和沉积相展布特征；g 和 h—沙四上亚段晚期沉积时期地震属性和沉积相展布特征

图 4 东营凹陷沙四段沉积时期地震属性和沉积相展布特征图

Fig. 4 Distribution of seismic attributes and sedimentary facies of the Member 4 of Shahejie Formation in Dongying sag



a—过井地震剖面；b—沉积相之间接触关系图

图 5 东营凹陷盐家地区永斜 927 井—永 930 井—永 935 井—丰深 10 井过井地震剖面及沉积相之间接触关系图

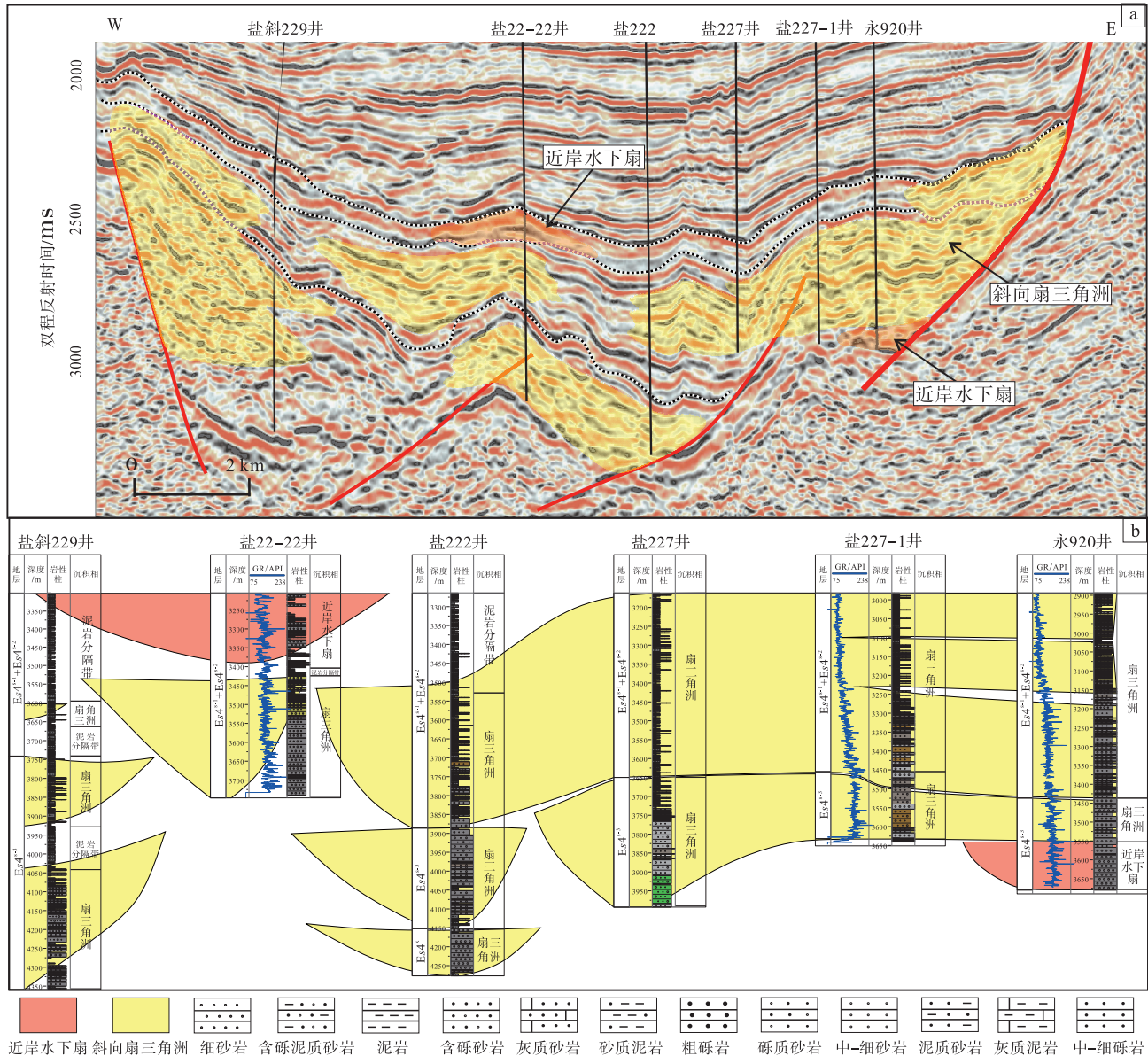
Fig. 5 YX927-Y930-Y935-FS10 cross-well seismic profile and contact relationship between sedimentary facies

in Yanjia area of Dongying sag

块 4 和断块 5 之间发育小型斜向扇三角洲，扇体呈北东—南西向展布，扇体与陈南断层东、西段间发育的大型斜向扇三角洲交汇。紧邻边界断层处发育近岸水下扇，扇体紧邻边界断层，从平面上来看（图 4-d），成规模的近岸水下扇发育于断块 3 处，扇体数量较少，且规模相对较小。扇体主体呈现出舌状体，在前端呈现出扩散的特征。

至沙四上亚段沉积中期，东营凹陷北带西侧扇三角洲规模继续扩大，扇体连片发育，呈北西—南东向展布，扇体向深水区延伸 12 km，厚度变化大，在断层附近厚度可达 600 m 左右，向深水区，厚度大概仅为 15 m。断块 1 和断块 2 之间的小型扇

三角洲消失，被近岸水下扇取代（图 4-f），扇体向南西向延伸约 2 km，扇体呈线性，在端部呈不规则朵叶状散开。断块 2 与断块 3 之间、断块 3 和断块 4 之间发育小型扇三角洲，扇体厚度较大，超 600 m，在平面上呈不规则朵体展布。这些扇三角洲之间并非连通，中间发育泥岩分隔带（图 6）。此外，断块 2 和断块 3 之间的扇三角洲尽管与扇体东南部发育的近岸水下扇相邻，但扇体中间仍发育条带状的泥岩分隔带，在空间上并不接触。断块 4 与断块 5 之间小型扇三角洲消失，发育近岸水下扇，扇体呈北东—南西展布，与陈南断层东、西段间发育的大型扇三角洲交汇。



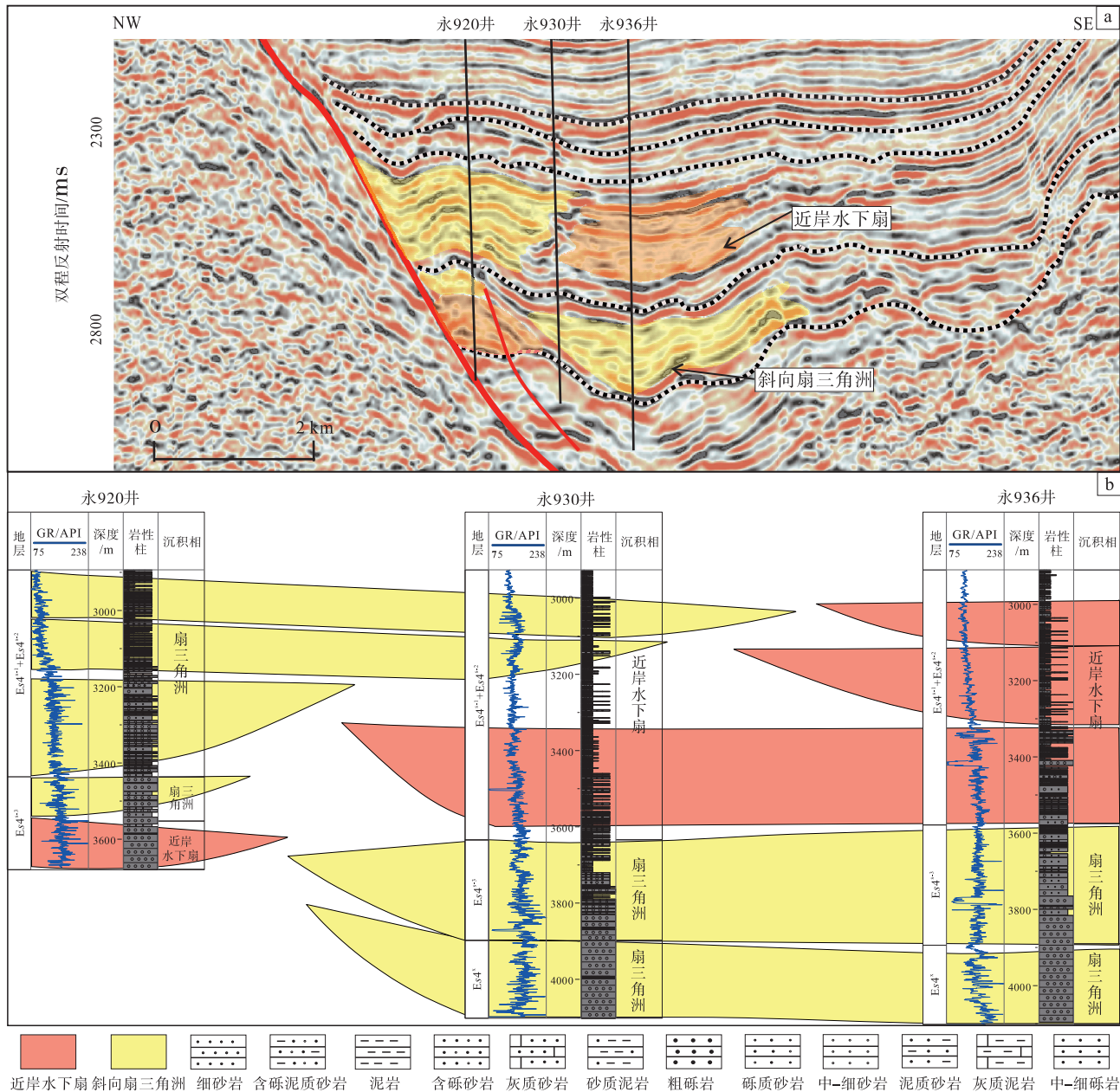
a—过井地震剖面；b—沉积相之间接触关系图

图 6 东营凹陷盐家地区永 920 井—盐 227-1 井—盐 227 井—盐 222 井—盐 22-22 井—盐斜 229 井过井地震剖面及沉积相之间接触关系图

Fig. 6 Y920-Y227-1-Y227-Y222-Y 22-22-YX229 cross-well seismic profile and contact relationship between sedimentary facies in Yanjia area of the Dongying sag

至沙四上亚段沉积晚期，陈南断层东西段间的扇三角洲持续发育，扇体连片发育，呈北西—南东向展布，前端疑似发育滑塌浊积扇(图 4-h)。断块 2 与断块 3 之间依旧发育小型扇三角洲，扇体向南西向延伸达 2.2 km，在顺物源地震剖面上仍旧表现为小型的帚状前积地震相(图 7)。断块 3 与断块 4 处小型扇三角洲被近岸水下扇取代，扇体规模较下伏扇体大大减小，厚度由 679 m 减薄为 175 m

(图 3-b)，在顺物源地震剖面上表现为小型帚状前积相(图 3-b)，在垂直物源地震剖面上表现为透镜体相(图 3-c)，规模减小至 1.2 km。近岸水下扇垂直于边界断层发育，平面上呈褶裙状分布，在平行边界断层的地震剖面中，扇体表现为漂浮状透镜体(图 7-a)。从沙四段垂向演化来说，近岸水下扇的规模和数量在沙四上亚段沉积晚期最大、最多。



a—过井地震剖面；b—沉积相之间接触关系

图 7 东营凹陷盐家地区永 920 井—永 930 井—永 936 井过井地震剖面及沉积相之间接触关系

Fig. 7 Y920–Y930–Y 936 cross-well seismic profile and contact relationship between sedimentary facies in Yanjia area of Dongying sag

综上所述，斜向扇三角洲主要发育于断陷早期，并于断陷中期大量消亡。扇体与边界断层并不是平行和垂直的关系，而是一种斜交的关系，斜交的角度通常为相对较低的角度，通常不会超过 45°。扇体的根部来自于边界断层间的构造调节带或断块间转换带，形状呈不规则朵叶体，其发育位置受到边界断层活动的约束，主要发育于断陷湖盆陡坡带。

2.4 斜向扇三角洲沉积模式

2.4.1 沉积模式

斜向扇三角洲广泛发育于断陷湖盆陡坡带。之所以称之为“斜向扇三角洲”，主要是因为扇体与边界断层呈斜交的关系，并不是平行和垂直的关系（图 8）。这种斜交的关系是由于转换构造斜交于边界断层发育，而扇三角洲的根部来源于斜交于边界

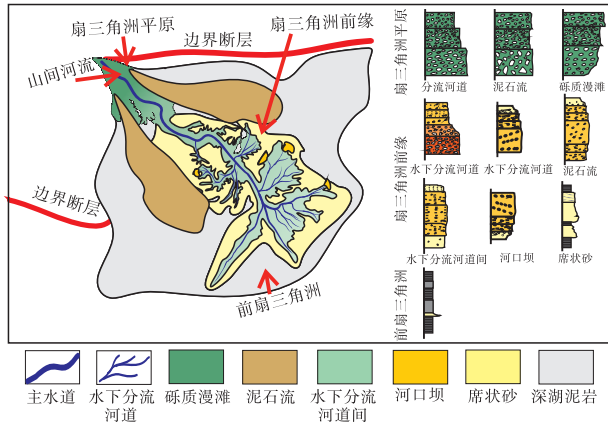


图 8 斜向扇三角洲沉积模式

Fig. 8 Depositional model of oblique fan delta

断层的转换带，导致形成的扇体与边界断层斜交。斜交的角度通常为相对较低的角度，通常不会超过 45°。这种低角度主要是由于边界断层对沉降中心控制力的增大使得这些离散的沉积中心不断地向边界断层靠近。

2.4.2 与轴向辫状河三角洲和短轴扇三角洲的差异对比

通过比对断陷湖盆陡坡带常见三角洲沉积类型，发现斜向扇三角洲与轴向辫状河三角洲和短轴扇三角洲有明显的区别(表 1)(朱筱敏和信荃麟, 1994; 闫鹏, 2009; 秦国省等, 2017; 葛家旺等, 2019; Muravchik *et al.*, 2020)。

从发育的时期来看，斜向扇三角洲多发育于断陷湖盆陡坡带早期，受控于边界断层的分段格局；轴向辫状河三角洲的发育通常比较稳定，与湖盆长轴边界的构造演化相关，可能会出现在断陷早期，也可能会贯穿整个断陷演化周期；短轴扇三角洲通常发育于断陷中—晚期。

从沉降位置和与边界断层的关系来看，斜向扇三角洲主要发育于陡坡带，扇体根部来源于边界断层中的转换带，扇体与边界断层呈低角度斜交；轴向辫状河三角洲不仅可以发育于陡坡带，也可以发育于缓坡带，由于扇体根部位于断陷湖盆长轴湖域边缘，扇体通常平行于边界断层发育；短轴扇三角洲主要沉积于边界断层陡坡带，扇体根部来自于边界断层上的古冲沟，扇体与边界断层垂直发育。

从沉积物成分成熟度来看，轴向辫状河三角洲具有较高的成分成熟度，石英含量高，整体约为 90%，最高可达 95%；斜向扇三角洲具有中等成分成熟度，石英含量介于 33%~58%之间；短轴扇三角洲沉积物的成分成熟度要略低于斜向扇三角洲，石英含量介于 26%~38%之间。

从沉积物特征来看，斜向扇三角洲的沉积物粒度与短轴扇三角洲相似，比轴向辫状河三角洲沉积物粒度粗。沉积构造多见反映泥石流的块状构造和洪水作用的反—正复合韵律，而在轴向辫状河三角洲沉积物中常见的槽状交错层理或板状交错层理相

表 1 断陷湖盆陡坡带斜向扇三角洲与轴向辫状河三角洲、短轴扇三角洲差异性对比

Table 1 Comparison of differences among oblique fan delta, axial braided river delta and short axis fan delta in steep slope zone of rift lacustrine basin

沉积相类型	与边界断层位置关系	沉积位置	发育时期	地震相特征		岩性特征	沉积构造	成分成熟度
				顺物源	垂直物源			
斜向扇三角洲	斜交	陡坡带	断陷早期	斜交、S型、叠瓦、帚状前积相	充填相	细砾岩、砾质砂岩、含砾砂岩	冲刷面、水平层理、波状交错层理、正递变层理、反递变层理、叠瓦构造、平行层理、反—正复合层理、块状构造	石英含量中等,约40%
轴向辫状河三角洲	平行	陡坡带或缓坡带	不固定甚至可以贯穿整个断陷周期	斜交、S型、斜交-S复合、叠瓦前积相	充填相	中砂岩、细砂岩	槽状或板状交错层理、冲刷面、水平层理、波状交错层理、正递变层理、反递变层理、叠瓦构造、平行层理、块状构造	石英含量较高,整体约为90%
短轴扇三角洲	垂直	陡坡带	断陷中—晚期	小型帚状前积相	透镜体相	中砾岩、细砾岩、砾质砂岩、含砾砂岩	冲刷面、水平层理、波状交错层理、正递变层理、反递变层理、叠瓦构造、平行层理、反—正复合层理、块状构造、包卷层理	石英含量中等,约30%

对少见。

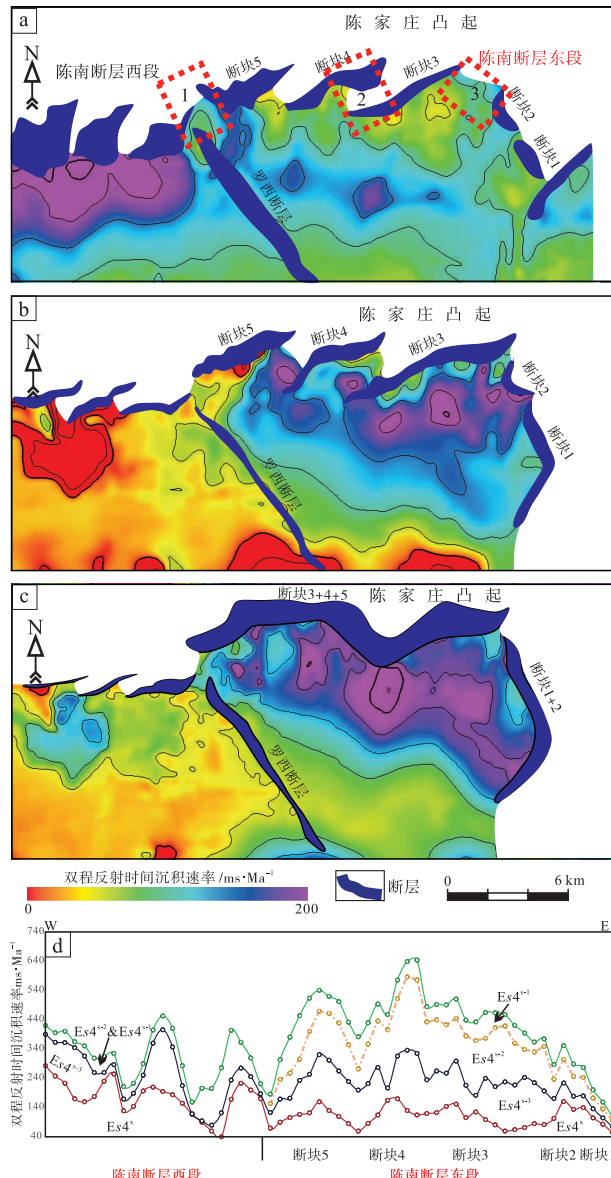
从储集层物性来看，整体上，轴向辫状河三角洲储集层孔隙度介于 15%~30% 之间，整体略高于斜向扇三角洲与短轴扇三角洲（14%~25%）。然而，不同沉积微相物性表现出一定的差异性。辫状河三角洲河口坝和水下分流河道物性较好，而水下分流河道间和席状砂主要由薄层细砂岩与泥岩互层，其孔隙度分别介于 1.5%~10% 和 1%~13.5% 之间；而斜向扇三角洲和短轴扇三角洲由于距离物源区较近，洪水作用频发，不仅河口坝和水下分流河道具有相对较好的物性，水下分流河道间、水下泥石流和席状砂发育相对厚层的块状粗、细砂岩，形成较好的储集体。经统计，斜向扇三角洲的水下分流河道间储集层孔隙度平均为 19.7%，水下泥石流储集层孔隙度平均为 14.2%，席状砂储集层孔隙度平均为 16.4%，也可作为油气勘探开发有利的沉积相带。

3 断陷湖盆陡坡带早期斜向扇三角洲的形成演化机制

本次研究在明确东营凹陷陡坡带陈南断层东段沙四段沉积时期拼合演化的基础上，从构造与输砂通道、可容纳空间、流体特征等角度出发，分析了断陷湖盆陡坡带早期斜向扇三角洲的形成演化机制。

3.1 东营凹陷陡坡带陈南断层东段拼合演化

本次研究主要基于高分辨率三维地震数据刻画断层多边形来进行断裂平面分布特征的研究。边界断层由于缺乏完整的两侧地层导致活动性难以量化，因此本次研究中采用垂直位移量来近似反映断层位移量（赵勇和戴俊生，2003）。陈南断层东段在沙四段沉积时期的演化过程（图 9）。沙四段构造运动强烈，最大沉降厚度逐渐由西边部分迁移至东边部分。沙四下亚段沉积时期，陈南断层东段分为 5 个断块，自东向西依次为断块 1、断块 2、断块 3、断块 4 和断块 5（图 9-a），其中断层 1 和断块 2 走向为北西—南东向，断块 3、断块 4 和断块 5 走向为北东—南西向，断块最大位移速率接近，均小于 180 ms/Ma（图 9-d）。到沙四上纯下亚段沉积时期，断块位移量整体增大，分段特征明显（图 9-b），其中断块 3 最为活跃，最大沉降量为 206 ms，断块 1 和断块 2 的最大位移量约为



a—为沙四下沉积时期 (Es_4^x)；b—为沙四上纯下亚段沉积时期 (Es_4^{x-3})；c—为沙四上纯上亚段沉积时期 (Es_4^{x-2} 和 Es_4^{x-1})；d—陈南断层演化过程

图 9 东营凹陷北带东段沉降速率平面图与陈南断层演化图（据 Li et al., 2021；有修改）

Fig. 9 Subsidence rate of eastern part and evolution map of Chennan fault of the northern Dongying sag (modified from Li et al., 2021)

180 ms/Ma（图 9-d）。断块的最大位移点已由断块中央向翼部迁移。至沙四上纯上亚段沉积早期，断块的位移量大幅度增加，断块 3 的最大位移量从 206 ms/Ma 增至 587 ms/Ma（图 9-d），此外，断块 1 和断块 2，断块 3 和断块 4 翼部发生连接（图 9-d）。至沙四上纯上亚段沉积晚期，断层位移量大

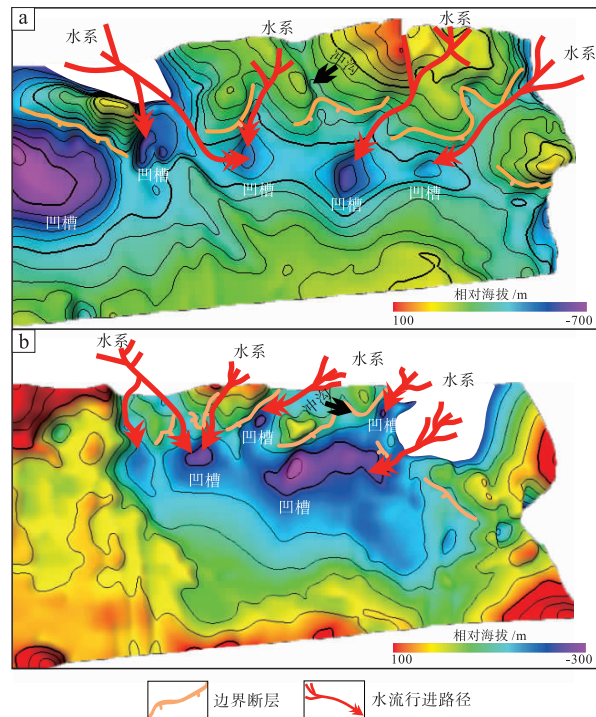
幅度降低，最大位移量为 148 ms/Ma (图 9-d)，断块 3、断块 4 和断块 5 连接成统一断层(图 9-c)。因此，至沙四段沉积末期，陈南断层东段由 5 个相对独立断块拼接为 2 个相对统一断层。

3.2 边界断层的分段为斜向扇三角洲发育提供输送通道

基于东营凹陷北带东段边界断层演化过程，认为断陷湖盆陡坡带早期发育的转换构造扮演了陆源碎屑物进入汇水盆地的通道(图 10)。断陷早期，边界断层具有明显的分段特征，并发育多种类型的转换构造(图 9-a 红框位置)。这些转换带与斜向扇三角洲的发育关系密切(图 4)。断陷早期，转换带存在时，斜向扇三角洲大量发育，扇体根部与转换带的位置一一对应；随着边界断层的生长，转换带消亡，斜向扇三角洲转换为近岸水下扇。转换带的坡度要比古冲沟平缓，据统计，陈南断层和埕南断层上转换带的坡度介于 $3.4^{\circ} \sim 6.8^{\circ}$ 之间，而古冲沟的坡度介于 $12^{\circ} \sim 23^{\circ}$ 之间，这种低缓的坡度为斜向扇三角洲的发育提供地形基础。此外，现代沉积湖盆陡坡带上升盘剥蚀地貌中观测到转换构造与水系之间有良好的对应关系。因此，断陷早期边界断层的分段为斜向扇三角洲发育提供输砂通道。

3.3 边界断层控制下的古凹槽为斜向扇三角洲发育提供可容纳空间

基于高分辨率三维地震数据体，恢复断陷湖盆陡坡带古地貌。东营凹陷陡坡带早期发育离散凹槽(图 10-a)。这些离散的凹槽与断块之间有良好的匹配性，说明伸展作用使得边界断层(块)产生张力，引起下降盘局部地形下陷，形成局部具有相对较大可容纳空间的凹槽。这些凹槽随着边界断层的演化而变化。断陷早期初期阶段，边界断层表现出明显的分段特征，这些离散的凹槽在断陷早期的初始期并没有紧邻边界断层发育，而是与边界断块有一段距离(图 10-a)，在地震剖面上地层表现出非楔形的特征(图 11)，说明边界断层在断陷早期的初始期对沉积的控制力并没那么强。随着构造活动的演化，边界断层的生长和连接使得孤立的断块形成统一的断层，离散的凹槽表现出逐渐形成统一凹槽的趋势，并且凹槽发育的位置向边界断层靠拢(图 10-b)，在地震剖面上地层由非楔形变为楔形，反映了边界断层对沉积的控制作用大幅度增强



a—沙四段沉积前古地貌特征；b—沙四上亚段沉积前古地貌特征

图 10 东营凹陷古地貌特征、古凹槽发育位置及水流行进路径

Fig. 10 Palaeogeomorphology characteristics, location of palaeo-trough development and flow path of Dongying sag

(图 11)。因此，凹槽的发育与边界断层活动关联密切。

在这个过程中，这些凹槽之所以能为斜向扇三角洲的发育提供沉降位置有以下 2 个方面的因素：一方面，这些凹槽具有相对较大的可容纳空间，可以为陆源碎屑提供沉降场所；另一方面，凹槽的发育距离物源注入的位置较近，常常正对着输砂通道(图 12)。因此，携带大量碎屑物的流体不需要经过长距离的搬运，而是直接进入具有相对较大可容纳空间的凹槽，并且发生快速沉降。此外，转换斜坡对应的沉积盆地的位置通常会发育脊(鼻状构造)，使得即便在深水的陡坡带，也会在物源注入位置发育浅水环境，形成滨浅湖相。

综上所述，断陷早期边界断层控制下的离散凹槽为斜向扇三角洲的发育提供沉降位置。

3.4 断块间的相互作用为斜向扇三角洲的发育提供物质来源

现代沉积观测表明，断陷湖盆上升盘发育剥蚀地貌，表现为纵横交错的山谷。这种地貌的形成与

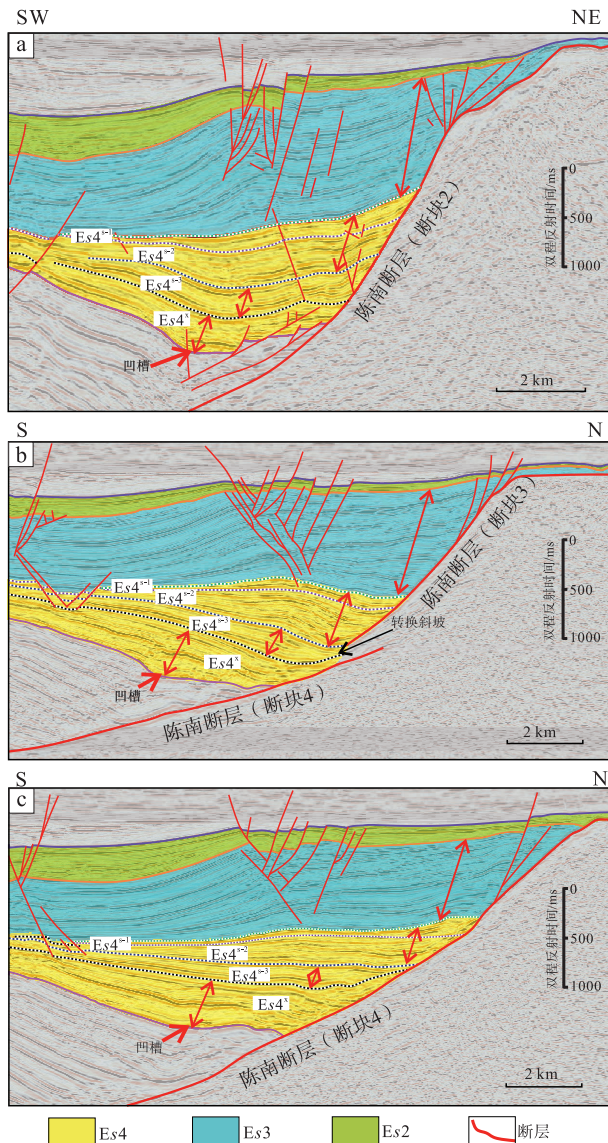


图 11 东营凹陷地震剖面中古凹槽的发育特征及位置迁移过程 (据 Li *et al.*, 2021; 有修改)

Fig. 11 Development characteristics and migration of palaeotroughs on seismic profile in Dongying sag (modified from Li *et al.*, 2021)

构造活动密切相关。强烈的构造活动形成了下盘的幕式抬升：一方面，每次断层活动后下盘地貌始终被抬升至高部位，这使得岩层更容易遭受风化的作用，发生破坏和崩塌 (Goodbred, 2003; Densmore *et al.*, 2007)；另一方面，山间河流的发育会通过下切作用切割地表，每次断层活动后，上下盘之间高差增大，增大河流沿主河道对山谷的下切力，这也就解释了断陷湖盆陡坡带强烈的构造运动可以源源不断地提供沉积物。

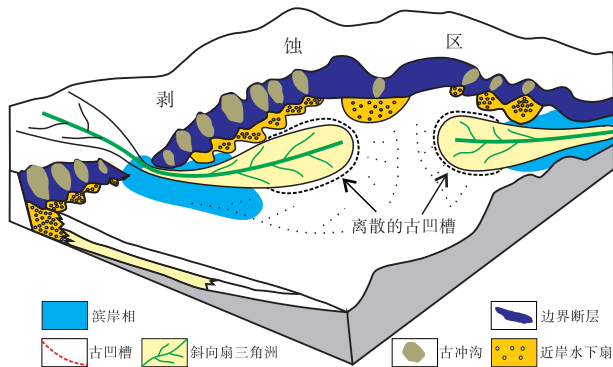
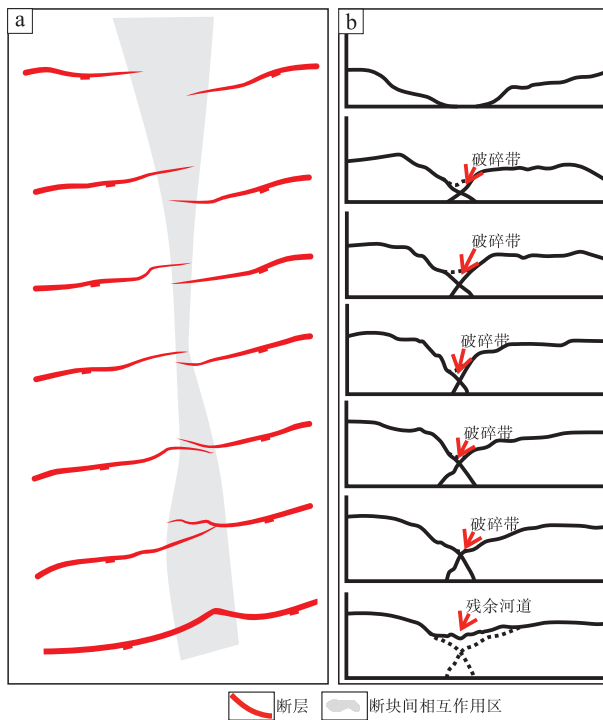


图 12 斜向扇三角洲展布与古凹槽发育之间关系模式
Fig. 12 Oblique fan delta model of distribution and development of palaeotroughs

此外，断层间的相互作用会增大沉积物的供给速率(图 9-b)。断块生长过程从孤立到相互作用再到连接过程中，沉积物供给速率表现出先大幅度增大再到快速减小的特点(图 9-b)。这是由于当独立断层伸展到与相邻断层之间发生相互作用时，2 个断层的最大伸展量会向翼部迁移，意味着最大应力点由断层中央向翼部迁移(图 13)。2 个断层的应力会在断层间形成局部挤压环境，这种局部的挤压环境不仅使得中间地层不断下陷形成河谷，为



a—断层间相互作用区平面展布；b—断层间相互作用区演化
图 13 断层生长过程中河道的演化模式

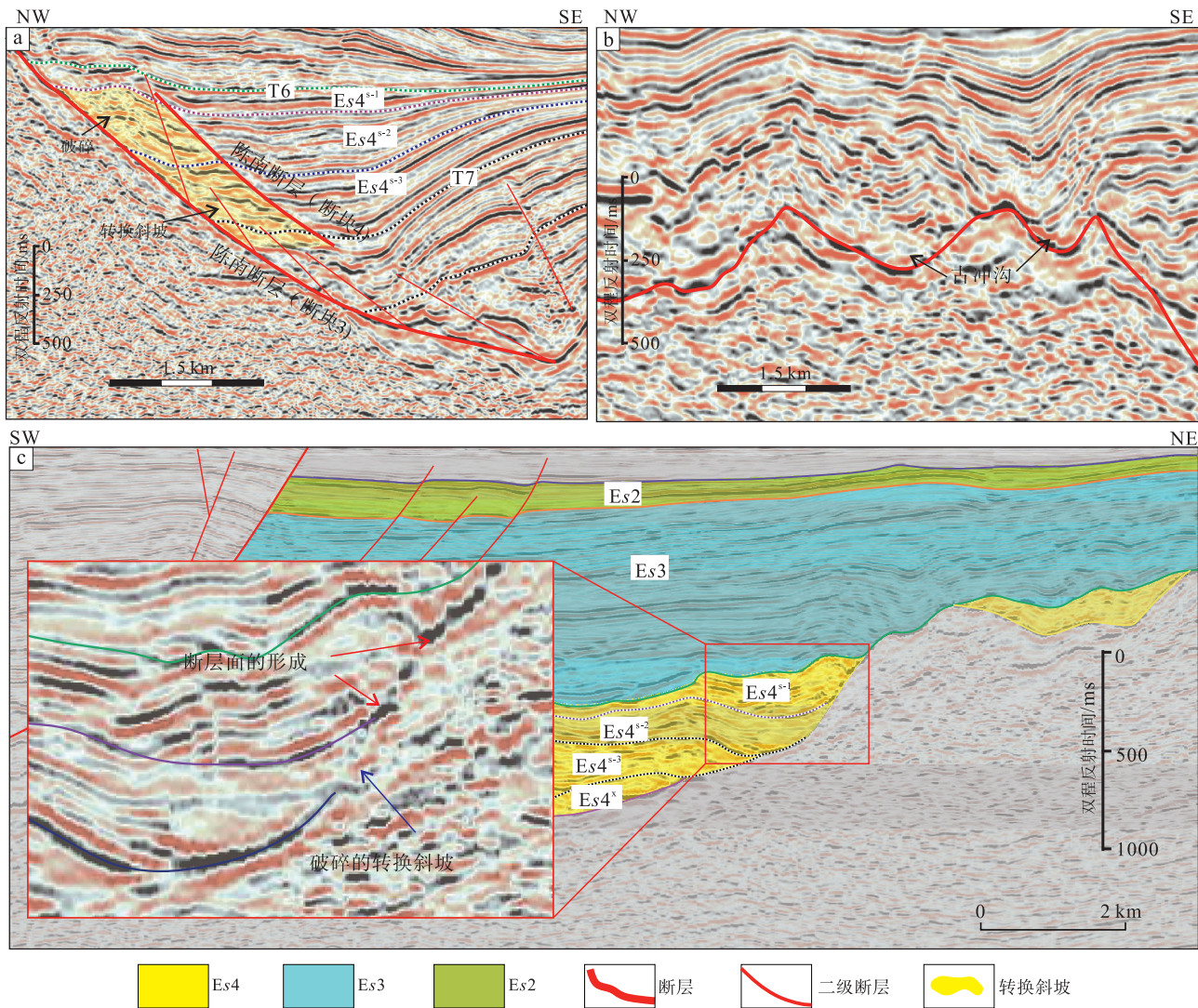
Fig. 13 Evolution of river channel during fault growth

河流的发育提供地形基础，而且形成破碎带(图 13)，提供了相对于断层之上更多的陆源碎屑。而当断层连接为统一的贯穿断层时，这种局部的挤压环境消失，地层停止下陷和破碎，由断层间转为断层上低洼的山谷。另外，断层间的相互作用会增大汇水盆地局部可容纳空间，更有利于陆源碎屑物的沉积。

3.5 边界断层的硬连接导致斜向扇三角洲向近岸水下扇转换

斜向扇三角洲主要发育于断陷早期，并在断陷中期发生了沉积相类型由斜向扇三角洲向近岸水下

扇的转换 (Li *et al.*, 2021)。这个转换与边界断层在早一中期的构造活动关系密切。首先，断陷早一中期的构造活动导致输砂通道类型的转换。当断层连接形成贯穿断层，伴随着转换斜坡的破碎与消亡和断面的产生。由于贯穿断层形成后，先前断块间的局部挤压力消失，剥蚀地貌断块间地层停止进一步下陷和破碎，但仍保持这低洼的地理优势和残余河道，可继续作为流体搬运的通道。因此，断陷早一中期的构造活动导致输砂通道由转换斜坡演变为冲沟(图 14-a, 14-b)。这个过程伴随着断面的逐渐产生(图 14-c)。其次，断陷早一中期的构造活动也导致流体性质发生了变化。当转换斜坡存在



a—转换斜坡地震反射特征；b—古冲沟地震反射特征；c—为平行于转换斜坡的北西—南东向地震剖面
图 14 断陷湖盆陡坡带转换斜坡演化为古冲沟的地震反射特征 (据 Li *et al.*, 2021; 有修改)

Fig. 14 Seismic reflection characteristic indicate conversion from the relay ramp to paleo-gully on steep slope zone of lacustrine rift (modified from Li *et al.*, 2021)

时,山间河流携带大量碎屑物质进入汇水盆地形成扇三角洲。这种流体主要以河流供给的牵引流为主(图2)。尽管强烈的断层活动容易导致山间河流的堵塞和溃决,爆发形成泥石流,但流体的主要性质仍为牵引流。当断层的分段特征消失形成贯穿的统一断层后,水系的改道或消亡使得残余河谷只有在洪水爆发时期可以形成间歇性“脏河”,触发季节性洪水异重流,形成近岸水下扇(Li *et al.*, 2021)。

4 结论及勘探启示

1) 斜向扇三角洲沉积物中砾石含量相对较高,由牵引流和重力流共同形成,石英含量平均介于40%~55%之间,发育扇三角洲平原、扇三角洲前缘和前扇三角洲亚相,其地震响应特征在顺物源方向表现为(斜交、叠瓦和帚状)前积相,在垂直物源方向表现为充填相。

2) 斜向扇三角洲主要发育于断陷早期,并于断陷中期大量消亡,扇体与边界断层以低角度斜交,角度通常不会超过45°,扇体的发育规模受到其根部所处位置的影响,扇体的消亡呈非等时性。

3) 断陷湖盆陡坡带早期大型斜向扇三角洲的形成演化主要受控于以下因素:边界断层分段特征形成的转换构造,为斜向扇三角洲的发育提供输送通道;断陷早期边界断层控制下的古凹槽,为斜向扇三角洲的发育提供可容纳空间;断块间相互作用形成的破碎带,为斜向扇三角洲的发育提供物质来源以及边界断层的硬连接导致斜向扇三角洲的消亡,并向近岸水下扇转换。

4) 断陷湖盆陡坡带深层砂砾岩体勘探往往由陡坡带向洼槽带方向(垂直于边界断层的短轴方向)部署井位,边界以泥岩为界。本次研究表明已发现的油气藏多属于紧邻边界断层发育的斜向扇三角洲,布井方向应沿斜交边界断层方向。此外,本次研究揭示了斜向扇三角洲发育的构造位置,为断陷湖盆陡坡带早期深层隐蔽油气藏勘探靶区提供理论依据。

参考文献 (References)

白立科,邱隆伟,杨勇强,杜玉山,王军,韩晓彤,董道涛,杨保良,汪丽芳. 2020. 近岸水下扇微相划分研究及意义初探:以滦平盆地地下白垩统西瓜园组为例. 地质学报, 94(8): 2446-2459. [Bai L K, Qiu L W, Yang Y Q, Du Y S, Wang J, Han X T, Dong D T, Yang

B L, Wang L F. 2020. Study on microfacies division of nearshore subaqueous fans and its significance: taking the Lower Cretaceous Watermelon Garden Formation in Luanping Basin as an example. Acta Geologica Sinica, 94(8): 2446-2459]

葛家旺,朱筱敏,吴陈冰洁,张向涛,贾连凯,易震,肖张波. 2019. 辫状河三角洲沉积特征及成因差异:以珠江口盆地陆丰凹陷恩平组为例. 石油学报, 40(S1): 139-152. [Ge J W, Zhu X M, Wu C B J, Zhang X T, Jia L K, Yi Z, Xiao Z B. 2019. Sedimentary characteristics and genetic difference of braided delta: a case study of Enping Formation in Lufeng sag, Pearl River Mouth Basin. Acta Petroli Sinica, 40(S1): 139-152]

刘震,李晋,刘惠民,王晓文,卢朝进,任梦怡,钱亮亮,王春颖. 2022. 陆相断陷盆地陡坡带早期大型斜向扇三角洲的发现及其勘探潜力. 地质学报, 96(1): 265-283. [Liu Z, Li J, Liu H M, Wang X W, Lu C J, Ren M Y, Qian L L, Wang C Y. 2022. The discovery of large-scale oblique fan delta and potential for its exploration during the early stage in the steep slope zone of the continental rift basin. Acta Geologica Sinica, 96(1): 265-283]

秦国省,吴胜和,宋新民,邹存友,郑联勇,陈诚. 2017. 远源细粒辫状河三角洲沉积特征与单砂体构型分析. 中国石油大学学报(自然科学版), 41(6): 9-19. [Qin G S, Wu S H, Song X M, Zou C Y, Zheng L Y, Chen C. 2017. Sedimentary characteristics of distal fine-grain braided delta and architecture analysis of single sand body. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 41(6): 9-19]

邱隆伟,韩晓彤,宋璠,杨勇强,王军,白立科,郭士博. 2021. 东营凹陷盐22区块沙四上亚段近岸水下扇岩相特征及沉积演化. 大庆石油地质与开发, 40(1): 26-37. [Qiu L W, Han X T, Song F, Yang Y Q, Wang J, Bai L K, Guo S B. 2021. Lithofacies characteristics and sedimentary evolution of the near shore subaqueous fans in the upper submember of Es4 in Block Yan 22 of Dongying Sag. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 40(1): 26-37]

闫鹏. 2009. 东风港油田沙四段沉积相特征研究. 中国石油大学(华东)硕士学位论文. [Yan P. 2009. Study on sedimentary facies of the 4th Member of Shahejie Formation in Dongfenggang Oilfield. Masteral dissertation of China University of Petroleum (East China)]

于景强,韩宏伟. 2020. 近岸水下扇坡积朵叶体沉积模式与成因机制. 沉积学报, 38(2): 411-419. [Yu J Q, Han H W. 2020. Sedimentary model and genetic mechanism for the alluvial lobes of the offshore underwater fan slope. Acta Sedimentologica Sinica, 38(2): 411-419]

赵勇,戴俊生. 2003. 应用落差分析研究生长断层. 石油勘探与开发, 30(3): 13-15. [Zhao Y, Dai J S. 2003. Identification of growth fault by fault fall analysis. Petroleum Exploration and Development, 30(3): 13-15]

张功成,刘震. 2014. 中国含油气裂谷盆地构造. 北京:石油工业出版社. [Zhang G C, Liu Z. 2014. Structure of China Petroliferous Rift Basin. Beijing: Petroleum Industry Press]

朱筱敏,信荃麟. 1994. 湖泊扇三角洲的重要特性. 中国石油大学学报(自然科学版), 18(3): 6-11. [Zhu X M, Xin Q L. 1994. Im-

- portant features of lacustrine fan. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition)*, 18(3): 6-11]
- Cao Y C, Wang Y Z, Gluyas J G, Liu H M, Liu H N, Song M S. 2018. Depositional model for lacustrine nearshore subaqueous fans in a rift basin: the Eocene Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China. *Sedimentology*, 65: 2117-2148.
- Cao Y C, Jin J H, Liu H N, Yang T, Liu K Y, Wang Y Z, Wang J, Liang C. 2021. Deep-water gravity flow deposits in a lacustrine rift basin and their oil and gas geological significance in Eastern China. *Petroleum Exploration and Development*, 48: 286-298.
- Commings D, Gupta S, Cartwright J. 2005. Deformed streams reveal growth and linkage of a normal fault array in the Canyonlands graben, Utah. *Geology*, 33: 645-648.
- Densmore A L, Gupta S, Allen P A, Dawers N H. 2007. Transient landscapes at fault tips. *Journal of Geophysical Research*, 112: F03S08.
- Giba M, Walsh J J, Nicol A. 2012. Segmentation and growth of an obliquely reactivated normal fault. *Journal of Structural Geology*, 39: 253-267.
- Goodbred S L. 2003. Response of the Ganges dispersal system to climate change: a source-to-sink view since the last interstade. *Sedimentary Geology*, 162: 83-104.
- Larsen P H. 1988. Relay structures in a Lower Permian basement-involved extension system, East Greenland. *Journal of Structural Geology*, 10: 3-8.
- Li J, Liu Z, Liu J P, Chen L, Liu H M, Huang L L, Qian L L, Lu K, Liu K M. 2021. Transformation of sediment delivery and dispersal patterns controlled by relay-ramp evolution along the boundary fault of a lacustrine rift: the Eocene Shahejie formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 128: 105044.
- Liu J P, Xian B Z, Ji Y L, Gong C L, Wang J H, Wang Z, Chen P, Song D L, Wei W Z, Zhang X M, Dou L X. 2020. Alternating of aggradation and progradation dominated clinothems and its implications for sediment delivery to deep lake: the Eocene Dongying Depression, Bohai Bay Basin, East China. *Marine and Petroleum Geology*, 114: 104197.
- Liu J P, Xian B Z, Tan X F, Zhang L, Su M, Wu Q R, Wang Z, Chen P, He Y X, Zhang S H, Li J, Gao Y, Yu Q H. 2022. Depositional process and dispersal pattern of a faulted margin hyperpycnal system: the Eocene Dongying Depression, Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 135: 105405.
- Mann P. 2007. Global catalogue, classification and tectonic origins of restraining-and releasing bends on active and ancient strike-slip fault systems. *Geological Society, London, Special Publications*, 290: 13-142.
- Morley C K, Nelson R A, Patton T L, Munn S G. 1990. Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. *AAPG Bulletin*, 74(8): 1234-1253.
- Morley C K. 1988. Variable extension in Lake Tanganyika. *Tectonics*, 7: 785-801.
- Muravchik, Martin, Henstra, Gijs Allard, Eliassen Gauti, Gawthorpe Rob, Leeder M R, Kranis H, Skourtsos E, Andrews J. 2020. Deep-water sediment transport patterns and basin floor topography in early rift basins; Plio-Pleistocene syn-rift of the Corinth Rift, Greece. *Basin Research*, 32(5): 1184-1212.
- Peacock D C P, Sanderson D J. 1994. Geometry and development of relay ramps in normal fault systems. *AAPG Bulletin*, 78(2): 147-165.
- Schlische R W. 1995. Geometry and origin of fault-related folds in extensional settings. *AAPG Bulletin*, 79(11): 1661-1678.
- Walsh J J, Watterson J. 1991. Geometric and kinematic coherence and scale effects in normal fault systems. *Geological Society, London, Special Publications*, 56(1): 193-203.
- Yang Y Q, Kra K L, Qiu L W, Yang B L, Dong D T, Wang Y Z, Khan D. 2023. Impact of sedimentation and diagenesis on deeply buried sandy conglomerate reservoirs quality in nearshore sublacustrine fan: a case study of lower Member of the Eocene Shahejie Formation in Dongying Sag, Bohai Bay Basin (East China). *Sedimentary Geology*, 444: 106317.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 徐杰)