

东营凹陷边界断层活动性与沉积演化耦合关系的量化表征

张伟忠^{1,2}, 查明¹, 韩宏伟², 于景强², 崔世凌², 曲志鹏²

(1. 中国石油大学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)

摘要:基于边界断层组合样式及演化特征的分析,利用新方法量化表征边界断层活动性特征,并从微观-宏观角度分析边界断层活动性对沉积的控制作用,最终建立基于断层活动性的沉积模式量板。结果表明:东营凹陷北带沙四期边界断层活动性自西向东具有弱—强弱交替—强的变化特征;微观上,边界断层活动性控制形成了稳定—富物源型、动荡—富物源型、稳定—贫物源型和动荡—贫物源型 4 种沉积环境;宏观上,边界断层活动性与沉积厚度呈正相关关系,与推进距离呈负相关关系;微观与宏观上相结合,可以建立基于断层活动性的沉积模式识别量板,明确边界断层活动性与陡坡带沉积演化的耦合关系。

关键词:断层发育;沉积演化;耦合关系;东营凹陷

中图分类号:TE 121.2 **文献标志码:**A

引用格式:张伟忠,查明,韩宏伟,等. 东营凹陷边界断层活动性与沉积演化耦合关系的量化表征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(4):18-26.

ZHANG Weizhong, ZHA Ming, HAN Hongwei, et al. Quantitative research of coupling relationship between boundary fault activity and sedimentary evolution in Dongying Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(4): 18-26.

Quantitative research of coupling relationship between boundary fault activity and sedimentary evolution in Dongying Depression

ZHANG Weizhong^{1,2}, ZHA Ming¹, HAN Hongwei², YU Jingqiang², CUI Shiling², QU Zhipeng²

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Geophysical Research Institute in Shengli Oilfield, Dongying 257022, China)

Abstract: Based on the analysis of the combination patterns and evolution characteristics, the boundary fault activity in Dongying Depression was studied quantitatively using a new method. The relationship between the boundary fault activity and the depositing process was analyzed at the micro to the macro level, and the depositional models template based on fault activity was built. Results show that the activity of boundary fault in Dongying Depression has "weak-alternating strength-strong" characteristics from west to east. At the microscopic level, boundary fault activity controls the four types of sedimentary environment: "stable-rich source", "unstable-rich source", "stable-poor source", and "unstable-poor source". At the macro level, the boundary fault activity has a positive correlation with the sedimentary thickness and negative correlation with forward distance. Combining both microcosm and macrocosm, the depositional models template was built based on boundary fault activity, and the coupling relationship between boundary fault activity and steep slope sedimentary evolution has been defined quantitatively.

Keywords: fault activity; sedimentary evolution; coupling relationship; Dongying Depression

断层对沉积的控制作用一直是断陷盆地内构造—沉积匹配关系研究中的热点问题^[1-6]。断层的发

育控制着断陷盆地的形成和构造带的分布,而断层的静态几何特征与组合关系则控制着沉积体系的类

型。不同时期断层活动性的差异控制了沉积中心的迁移,同时也对沉积相的类型具有一定的影响。边界断层活动对沉积环境和沉积模式的控制作用方面的研究相对较少,主要存在两个研究难点。一是边界断层的活动性特征目前尚未有合适的定量方法。目前,断层活动性研究常用的方法有生长指数法、断层落差法及断层活动速率法等,这些方法主要是针对两盘地层相对完整的盆内断层,而专门针对边界断层活动性的研究方法较少。二是定量表征边界断层对沉积的控制作用难度较大。通常的定性分析方法很难从本质上认识边界断层与沉积演化的耦合作用。东营凹陷北带沙四段沉积相的研究已经较为成熟,主要发育了扇三角洲及近岸水下扇等沉积类型。这些扇体紧邻利津和民丰两大生烃洼陷,具有良好的聚油背景和条件,构成了陡坡带的主要储集体类型,是长期以来胜利油田增储上产的重要勘探目标。前人的研究工作主要侧重于扇体的沉积模式及规律的研究,提出了“沟扇对应”、“断坡控砂”等重要的

认识。在前人研究的基础上,针对上述两个研究难点,笔者对边界断层活动性特征及其对沉积的控制作用进行研究。

1 区域地质概况

东营凹陷是一个典型的新生代箕状断陷盆地,构造上属于渤海湾盆地济阳拗陷内的一个次级构造单元,位于渤海湾盆地的东南部。北部以断陷方式接触滨县凸起和陈家庄凸起,南部以超覆方式接触鲁西隆起和广饶凸起,东部靠近郯庐断裂带,向西为青城凸起,研究区位于东营凹陷北部陡坡带(图 1)。

研究区内发育滨南-利津、胜北及盐家 3 个主要的断裂带^[7]。3 个断裂带构造样式有差异,滨南-利津断裂带是由多条同向断层组成的阶梯式;胜北断裂带由主断裂和次级断层组成,主断裂呈座椅状,表现为双断式构造样式;盐家断裂带发育单条主断裂,呈单断式构造样式(图 2,剖面位置见图 1)。东营凹陷沙四时期处于断陷期,北部边界断裂强烈活

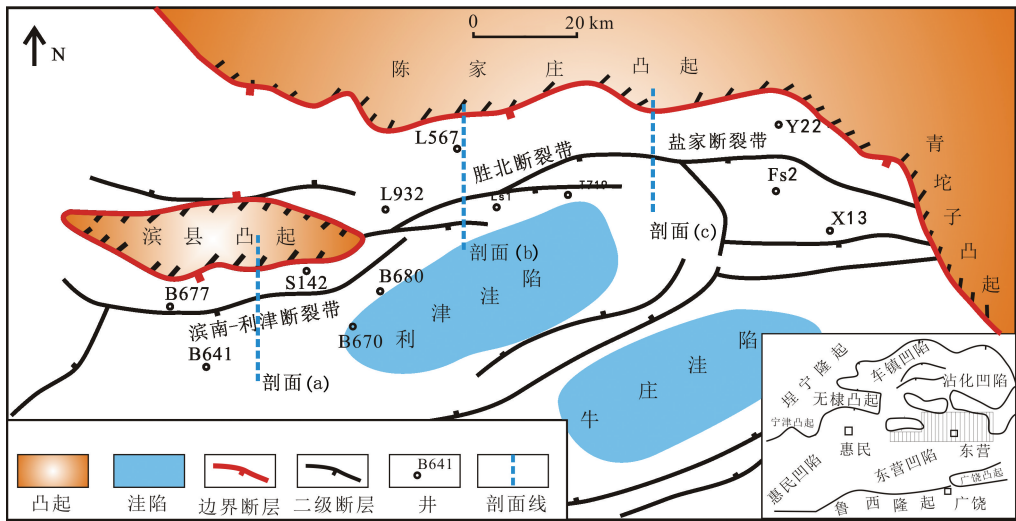


图 1 东营凹陷北带区域位置

Fig.1 Location of the north region of Dongying Depression

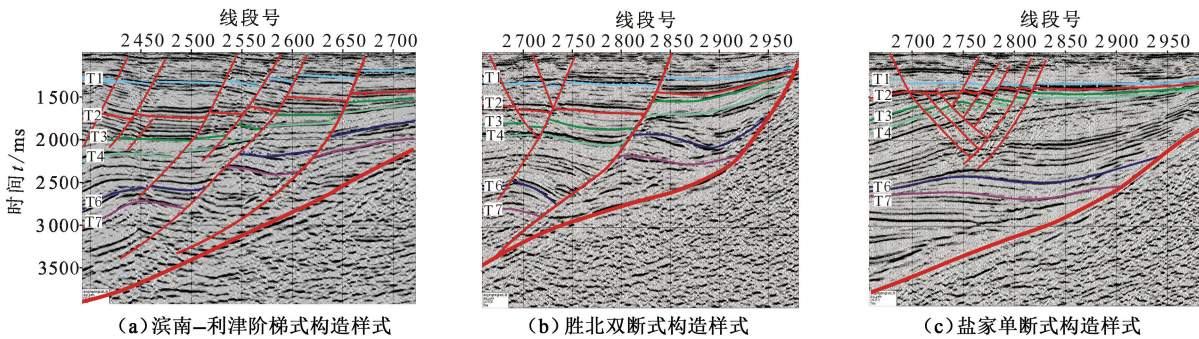


图 2 东营凹陷北带边界断层三种类型构造样式地震剖面

Fig.2 Seismic sections of three kinds of tectonic style in the north region of Dongying Depression

动,控制了本区的沉积体系^[8-9]。沙四下时期沉积类型以快速堆积的近岸水下扇沉积为主,从沙四中时期开始滨南-利津地区演化为扇三角洲沉积。胜北-盐家地区持续以近岸水下扇沉积类型为主。

2 边界断层活动性特征

2.1 边界断层构造演化

利用平衡剖面法对研究区3种类型的边界断层进行了构造复原,恢复不同类型构造样式的演化过程^[10]。结果表明,3种构造样式演化过程均有差异(图3)。滨南-利津断裂带沙四中亚段沉积前发育一条板式主断裂,到沙四上亚段沉积前开始发育与主断裂平行的多条次级断裂,组成阶梯状构造样式,后期阶梯状断裂样式持续发育;胜北断裂带在沙四中亚段

沉积前也发育一条板式主断裂,从沙四中亚段沉积期开始发育一条次级断裂,组成了双断构造样式,在之后的发育过程中,两条断裂在主活动期上有差异,次级断裂在沙三段和沙二段的沉积过程中活动强度超过主边界断裂,成为沉积中心的主控断裂;盐家断裂带从沙四中亚段沉积前开始,主断裂一直呈现铲式构造样式,持续地控制了下降盘沉积中心的发育。从横向对比来看,3个断裂带在沙四下亚段沉积时边界断层均呈板式或铲式,从沙四中亚段沉积开始逐渐分化,自东向西构造样式由简单的盐家单断式变为胜北双断式,到滨南利津断裂带则变为多级断裂组成的阶梯式,构造样式从简单到复杂的多变性也反映了东营凹陷北带构造背景的复杂性。

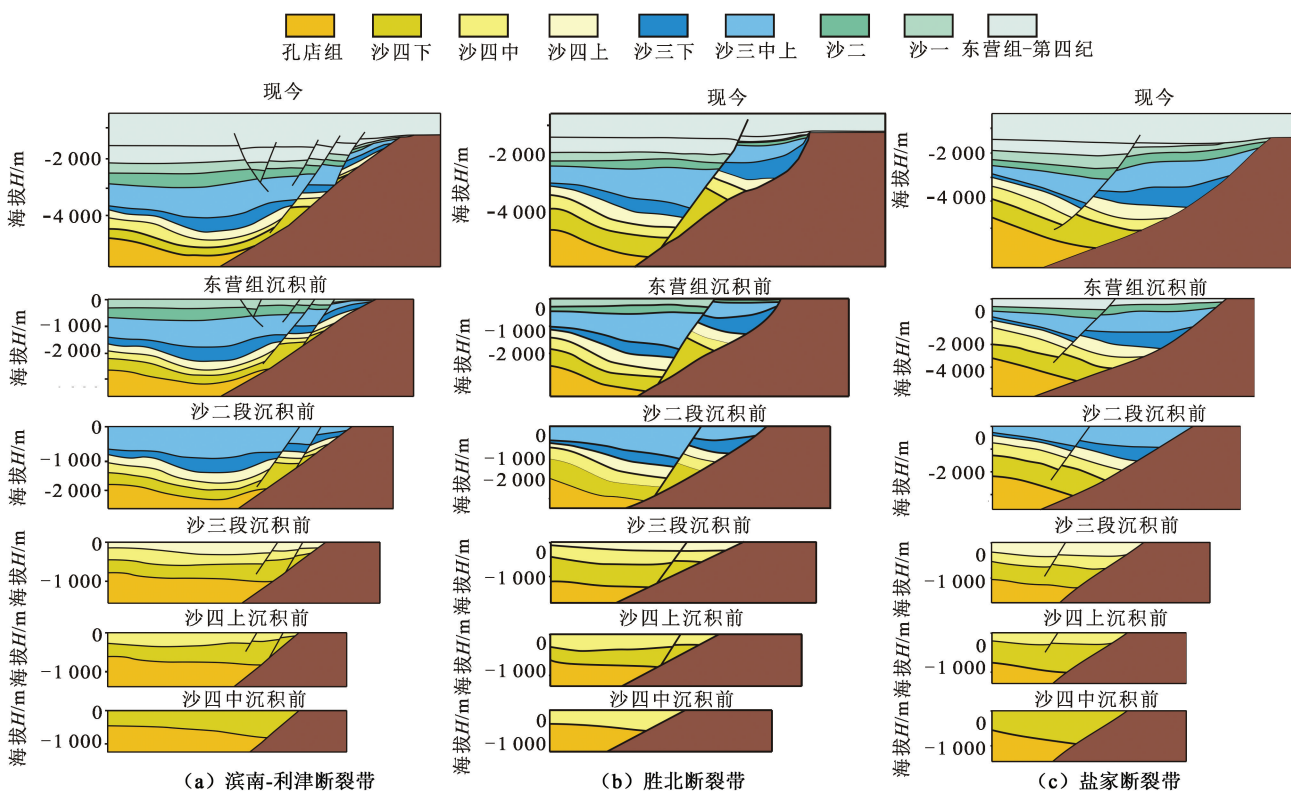


图3 东营凹陷边界断裂平衡剖面

Fig. 3 Balanced section of boundary fault in Dongying Depression

2.2 一种新的边界断层活动性计算方法

目前断层活动性的评价方法已经实现量化,常用的方法有生长指数法^[11]、断层落差法^[12]及断层活动速率法^[13]等。生长指数法是断层活动性评价中最常用的方法,利用上下盘对应地层厚度的比值来表示断层活动性的大小,但是生长指数不能用来评价上下盘地层有剥蚀或没有接受沉积的断层。断层落差能够有效避免生长指数的缺陷,但是没有体现地质时间的概念,不能很好地表现断层在单位

地质时间上的活动特征。断层活动速率法较好地结合了前两者的优点,能够反映断层在某一地质历史时间内的垂向活动强度,缺点是没有考虑断层倾角的影响。同样的落差,不同的断层倾角,虽然断层活动速率的结果一样,但实际上断层位移的距离是有差异的。

综合考虑前人的研究^[14-17],结合边界断层特殊的地层接触特征,提出针对边界断层的活动性评价参数——断层滑动速率 S (图4)。这种方法在构造

恢复的基础上规避了地层缺失的影响,又同时考虑了古落差、断层倾角和沉积时间 3 个因素,更为全面的反映了边界断层的活动性特征:

$$S_i=(D_i/\sin\alpha)/T_i.$$
(1)

式中, S_i 为第 i 时期断层滑动速率, m/Ma ; D_i 为第 i 期断层古落差, m ; T_i 为第 i 期地层时间间隔, Ma ; α

为断面真倾角, $(^\circ)$ 。
公式中的参数取值方法为:首先利用回剥法将目的层恢复到沉积期末的状态,然后将构造复原之后的两盘地层厚度差作为古落差 D 。断层倾角取垂直于断层走向方向的断面真倾角,沉积时间 T_i 为地层年代表中的时间间隔^[18]。

方法\项目	图解	公式	地质意义	适用性
生长指数 M		$M=H/h$ H :下降盘地层厚度 h :上升盘地层厚度	断层两侧同一地层单元的下陷盘厚度与上升盘厚度的比值	未考虑沉积时间及断层倾角,适用于稳定构造背景下断层活动性研究
古落差 D/m		$D_i=H_1-h_1$ D_i :第 i 期古落差 h_1 :第 i 期上升盘地层厚度 H_1 :第 i 期下降盘地层厚度	垂直于断层走向的剖面上断层两盘相当层之间的铅直距离	未考虑沉积时间及断层倾角,适用于低级别断层活动性研究
断层活动速率 $Q/(\text{m}\cdot\text{Ma}^{-1})$		$Q=D_i/\Delta T_i$ D_i :第 i 期古落差 ΔT_i :沉积时间间隔	某一地质时期内断层落差与时间跨度的比值,反映断层垂向活动速率	未考虑断层倾角,适用于低级别断层活动性研究
断层滑动速率 $S/(\text{m}\cdot\text{Ma}^{-1})$		$S=\frac{D_i/\sin\alpha}{\Delta T}$ D_i :第 i 期古落差 ΔT :沉积时间间隔 α :断层倾角	某一地质时期内断层沿断面滑动距离与时间跨度的比值,反映了断层真实活动速率	同时考虑了沉积时间和断层倾角的影响,能更全面的表征断层活动特征,适用于边界断层的活动性研究

图 4 断层活动性研究方法对比

Fig. 4 Methods of fault activity research

2.3 东营凹陷北带边界断层活动性特征

利用断层滑动速率法对沙四上、中、下 3 个时期边界断层活动性的时空特征进行了分析(图 5)。从时间上看,沙四下时期边界断层整体表现为强烈活动的特征,分为滨南-利津、胜北和盐家 3 个活动中

心,最大的活动强度为 380 ~ 400 m/Ma , 3 个地区相差不大。断裂带中部活动强度最大,向构造转换带处活动强度减弱;沙四中上时期边界断层的活动强度开始分化,滨南地区断层活动持续减弱,到沙四上时期最大活动强度减弱为 147 m/Ma ,盐家地区断层

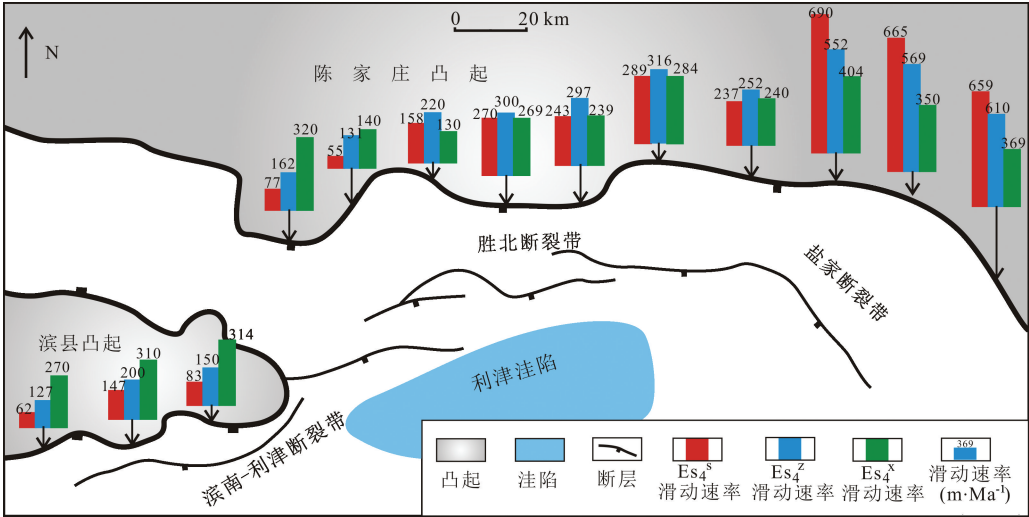


图 5 东营凹陷北带沙四期边界断层活动性平面分布

Fig. 5 Boundary fault activity histogram in the fourth period of Shahejie Formation of the north region of Dongying Depression

持续增强,到沙四上时期断层活动强度增大到 660 m/Ma,胜北地区断层活动强弱交替,整体上表现为西弱东强的特征。从空间上来看,3 个地区边界断层活动性变化规律有差异,滨南地区边界断层早期活动剧烈,后期断层活动逐渐减弱;利津地区边界断层活动强弱交替变化;胜坨-盐家地区早期活动相对较弱,后期逐渐增强。这种活动性在时空上的变化不仅控制了沉积体系的宏观分布规律,也直接影响了沉积环境和沉积模式。

3 边界断层活动性与沉积演化耦合关系的量化表征

3.1 边界断层对沉积环境的微观控制

无论是事件性的重力流沉积或是相对稳定的牵引流沉积都是断层在一段时间内活动强度对沉积环境的影响。依据断层活动强度与物源条件的相互匹配关系,可将东营凹陷北带沙四段的沉积环境划分为稳定-富物源型、动荡-富物源型、稳定-贫物源型和动荡-贫物源型等 4 种类型(图 6)。

从岩性、岩矿及粒度等方面分析了 4 种类型沉

积环境中与断层活动强度的匹配关系。当断层活动性较强时,富物源区往往以事件型重力流沉积为主,岩石类型以粗粒的砾岩、含砾砂岩等为主,可以见到倒立砾石,粒度曲线表现为圆弧上拱特征,层理类型以粒序层理和块状层理为主,沉积环境表现为动荡-富物源型,例如湖泊相中的近岸水下扇沉积。贫物源区则以动荡水流环境中的细粒沉积为主,岩石类型以粉砂质泥岩、灰质泥岩等为主,岩石粒度细,粒度曲线表现为圆弧上拱的一段式。层理构造以波纹层理、水平层理等类型为主,见有变形构造、滑塌构造等,例如近岸水下扇的扇间沉积。

当断层活动相对较弱—中等强度时,富物源区以稳定的牵引流沉积为主,岩石类型为含砾砂岩、细砂岩、粉砂岩等,岩石颗粒分选好,粒度较细,粒度曲线表现为三段式、两段式等类型。岩石颗粒磨圆好,分析中等—好,粒度曲线以三段式和二段式为主,例如扇三角洲相中的分流河道沉积。贫物源区以稳定的细粒沉积为主,岩石少见波动构造,层理类型以水平层理为主。

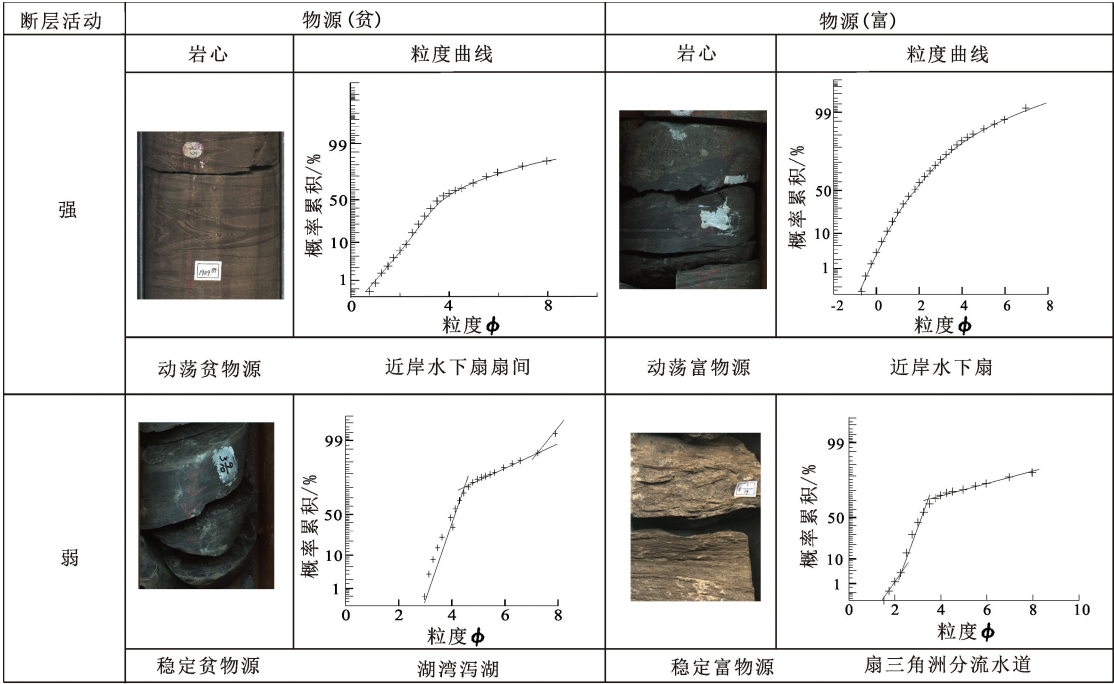


图 6 沉积环境分类

Fig. 6 Classification of sedimentary environment

3.2 边界断层对沉积体系的宏观控制

(1)强活动断层控制沉积厚度中心。强活动的边界断层在一定程度上控制了沉积厚度中心的迁移。沙四段上、中、下 3 个亚段扇体厚度图与活动强度对比分析结果表明(图 7):沙四下时期,边界断层

活动剧烈,3 个强活动中心对应 3 个沉积厚度中心;到沙四中、上时期滨南地区断层活动强度开始减弱,盐家地区断层持续强烈活动,厚度中心逐渐向利津及盐家地区迁移。

(2)弱活动断层控制最大沉积推进距离。弱活

动强度的边界断层控制了沉积的最大推进距离。从沉积的推进距离的变化来看,3 个地区差异也较大。滨南地区沉积推进距离持续变大;盐家地区推进距离则持续减小;利津地区沙四中时期推进距离最小,沙四上时期推进距离最大。

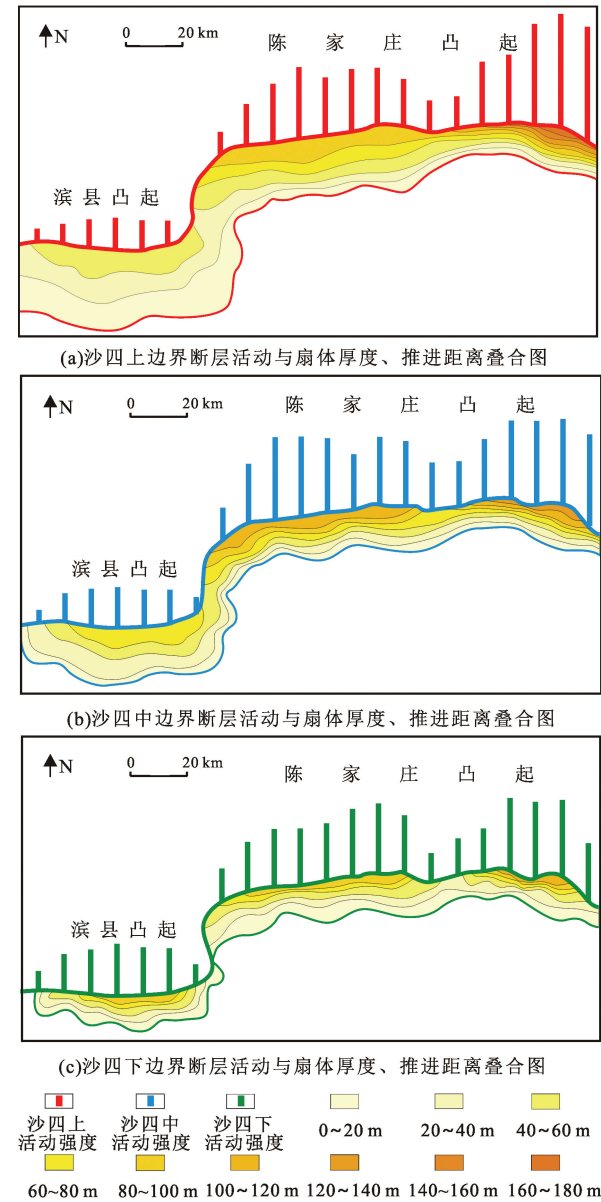


图 7 东营凹陷北带沙四期断层活动与沉积厚度、推进距离叠合图

Fig. 7 Composition map of sedimentary thickness and fault activity in the fourth period of Shahejie Formation of the north region of Dongying Depression

3.3 基于断层活动性分析的沉积模式量化表征

沿东营凹陷陡坡带计算 50 个点的边界断层活动性,并利用统计学方法分析边界断层活动性与其对应的沉积体厚度和推进距离之间的关系。研究表明:不同时期扇体沉积厚度与断层活动性的强度呈

现较好的正相关关系(图 8),断层活动性越强,沉积厚度越大。这反映了强活动构造背景下水进环境中事件性的沉积。扇体的推进距离与断层活动性之间是一种负相关关系,随着断层活动性的增强,扇体的推进距离变小。这反映了稳定构造背景下水退环境中持续的物源供给。

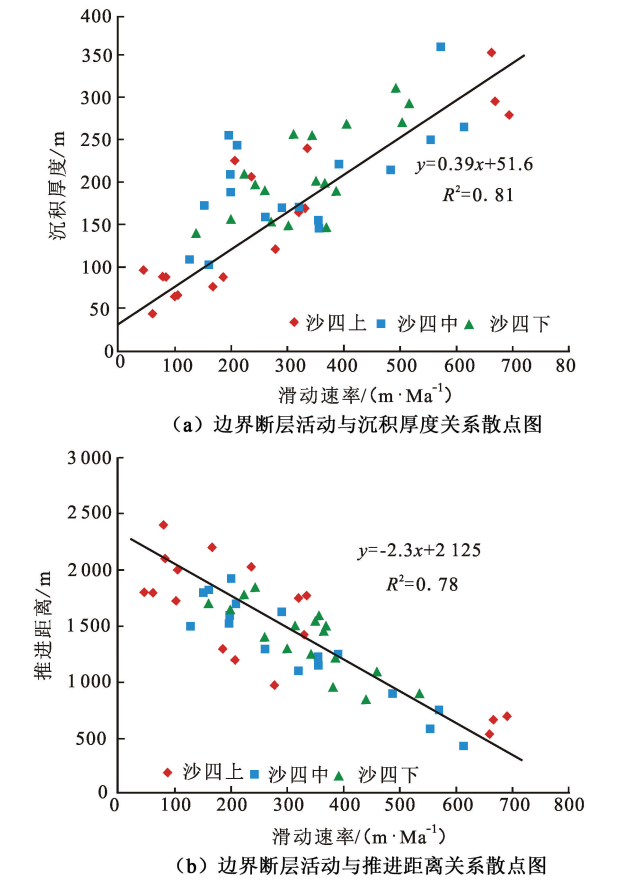


图 8 东营凹陷北带沙四期断层活动强度与沉积厚度、推进距离关系

Fig. 8 Scatter diagram between fault activity and sedimentary thickness, forward distance in the fourth period Shahejie Formation of the north region of Dongying Depression

通过分析断层活动性-沉积厚度-推进距离三者之间的相关关系,建立基于断层活动性的沉积模式量板(图 9)。当断层持续强活动,断层滑动速率大于 500 m/Ma 时,沉积厚度不断增大,推进距离不断收缩,在动荡-富物源的沉积环境中,形成了退积的沉积模式(盐家);断层活动由强变弱,断层滑动速率小于 300 m/Ma 时,沉积厚度不断减小,推进距离不断扩张,沉积环境由动荡向稳定转变,形成了进积的沉积模式(滨南-利津);断层活动强弱交替,断层滑动速率 300~500 m/Ma 时,沉积厚度与推进距离不规律的变化,则形成了叠覆式的沉积模式(胜

北)。通过分析东营凹陷北带沙四段3个亚段的沉积相特征,并结合断层活动性分析结果,建立了基于断层活动性的沉积模式量板,明确了沉积体系的演化过程与断层活动强度之间的关系(图9)。通过以

上工作,从本质上认识了边界断层与沉积演化之间的耦合关系,同时量化的沉积模式量板对于具备地震资料而钻井资料缺乏的勘探新区具有重要的预测意义。

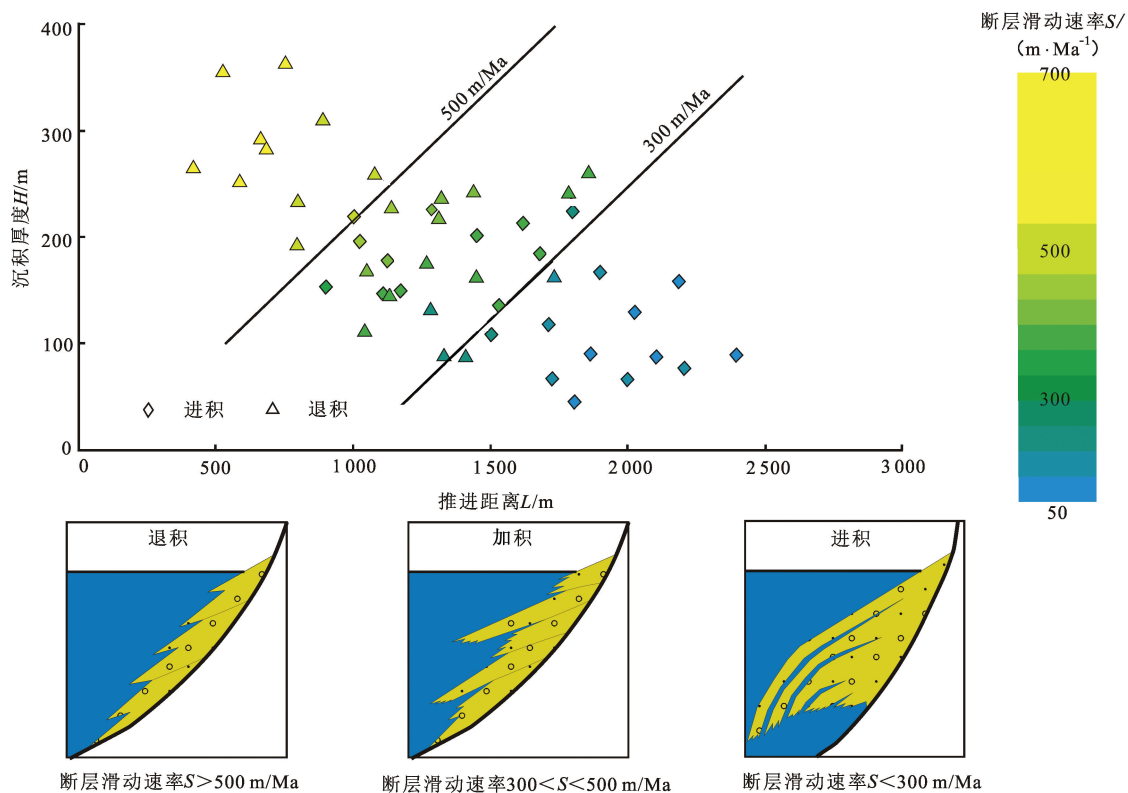


图9 东营凹陷北带沙四期沉积模式量板

Fig.9 Depositional model template in the fourth period of Shahejie Formation of the north region of Dongying Depression

4 结 论

(1)断层滑动速率法综合了多种方法的优点,同时考虑了沉积时间、古落差及断层倾角等因素,更能真实地表达边界断裂的活动性特征。东营凹陷北带沙四下时期,边界断裂活动性整体上都较强,分为3个强活动中心,到沙四中上时期活动强度开始分化,滨南-利津地区活动强度持续减弱,盐家地区活动强度持续增强,胜北地区活动强度交替变化。

(2)断层活动的强度和交替变化的规律对微观沉积环境有控制作用,东营北带陡岸沙四段的沉积环境划分为稳定-富物源型、动荡-富物源型、稳定-贫物源型和动荡-贫物源型等4种类型。不同类型的沉积环境中具有特定的沉积构造及岩性特征。

(3)断层活动强度与沉积厚度呈正相关关系,与推进距离呈负相关关系。当断层持续强活动,断层滑动速率大于500 m/Ma时,沉积厚度不断增大,推进距离不断收缩,在动荡-富物源的沉积环境中,

形成了退积的沉积模式(盐家);断层活动由强变弱,断层滑动速率小于300 m/Ma时,沉积厚度不断减小,推进距离不断扩张,沉积环境由动荡向稳定转变,形成了进积的沉积模式(滨南-利津);断层活动强弱交替,断层滑动速率300~500 m/Ma时,沉积厚度与推进距离不规则的变化,则形成了叠覆式的沉积模式(胜北)。

参考文献:

- [1] 叶兴树,王伟锋,陈世悦,等. 东营凹陷断裂活动特征及其对沉积的控制作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2006,21(5):29-33.
YE Xingshu, WANG Weifeng, CHEN Shiyue, et al. Characteristics of the fault activities in Dongying Depression and their controlling effects oil sediment[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2006, 21(5): 29-33.
- [2] 王志坤,钟建华,艾合买提江·阿布都热合曼. 断层几何学特征及对浊积岩的控制作用[J]. 西安石油大学

- 学报(自然科学版),2008,30(2):36-37.
- WANG Zhikun, ZHONG Jianhua, AHMATJAN · Abdurahman. Geometry characteristics of the fault and the control over turbidite[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30 (2):36-37.
- [3] 王永诗,鲜本忠.车镇凹陷北部陡坡带断裂结构及其对沉积和成藏的控制[J].油气地质与采收率,2006,13(6):5-8.
- WANG Yongshi, XIAN Benzong. Fault structures of northern steep slope belts and their influences on sedimentation and reservoir formation in Chezhen Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13 (6):5-8.
- [4] 李伟,吴智平,张明华,等.埕岛地区中生代和新生代断层发育特征及其对沉积的控制作用[J].中国石油大学学报(自然科学版),2006,30(1):1-6.
- LI Wei, WU Zhiping, ZHANG Minghua, et al. Development characteristic of Mesozoic and Cenozoic faults and its control over deposition in Chengdao area[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2006, 30(1):1-6.
- [5] 郑德顺,吴智平,李凌,等.惠民凹陷中生代和新生代断层发育特征及其对沉积的控制作用[J].石油大学学报(自然科学版),2004,28(5):6-12.
- ZHENG Deshun, WU Zhiping, LI Ling, et al. Development characteristic of faults in Mesozoic and Cenozoic of Huimin sag and its control to sediment[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2004, 28(5):6-12.
- [6] 陶晓风,刘登忠,朱利东.陆相盆地沉积作用与构造作用的关系[J].沉积学报,2001,19(3):410-414.
- TAO Xiaofeng, LIU Dengzhong, ZHU Lidong. Relationship between sedimentary process in terrestrial basin and tectonic process[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3):410-414.
- [7] 漆家福,肖焕钦,张卫刚.东营凹陷主干边界断层(带)构造几何学、运动学特征及成因解释[J].石油勘探与开发,2003,30(3):8-12.
- QI Jiafu, XIAO Huanqin, ZHANG Weigang. Geometry, kinematics and mechanism interpretation of the major boundary faults in Dongying sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3):8-12.
- [8] 鄢继华,陈世悦,姜在兴.东营凹陷北部陡坡带近岸水下扇沉积特征[J].石油大学学报(自然科学版),2005,29(1):13-16.
- YAN Jihua, CHEN Shiyue, JIANG Zaixing. Sedimentary characteristics of nearshore subaqueous fans in steep slope of Dongying depression[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2005, 29 (1):13-16.
- [9] 田景春.箕状断陷湖盆陡坡带砂体特征、演化及控制因素:以胜利油田东营凹陷北带沙河街组为例[J].矿物岩石,2001,21(3):56-63.
- TIAN Jingchun. The feature, evolution and controlling factors of terrigenous clastic reservoir sandbodies on the steep slope zone in the halfgraben-like rift lake basin taking shahejie formation of northern zone of Dongyin depression in Shengli oil field as example[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(3):56-63.
- [10] 李洪革,杜旭东,陆克政,等.渤海湾地区中西部中生代构造特征及演化[J].石油大学学报(自然科学版),1999,23(3):1-5.
- LI Hongge, DU Xudong, LU Kezheng, et al. Evolution and structural characteristics of the Mesozoic era in the control west part of Bohai Bay area[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1999, 23(3):1-5.
- [11] THORSEN C E. Age of growth faulting in southeast Louisiana Trans[J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 1963, 13:103-110.
- [12] 赵勇,戴俊生.应用落差分析研究生长断层[J].石油勘探与开发,2003,30(3):13-15.
- ZHAO Yong, DAI Junsheng. Identification of growth fault by fault fall analysis[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3):13-15.
- [13] 赵孟为.断层生长指数探讨[J].石油实验地质,1989,11(3):251-254.
- ZHAO Mengwei. Fault growth index discussion[J]. Experimental Petroleum Geology, 1989, 11(3):251-254.
- [14] 卢异,王书香,陈松,等.一种断裂活动强度计算方法及其应用[J].天然气地球科学,2010,21(4):614-616.
- LU Yi, WANG Shuxiang, CHEN Song, et al. Computing method about intensity of fault activity and its application[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(4):614-616.
- [15] 单业华,李志安,林舸.利用断层位移模式确定断层发育史的一种方法[J].石油实验地质,2003,25(1):94-96.
- SHAN Yehua, LI Zhian, LIN Ge. A method for determining the history of faults using the model of fault displacements [J]. Experimental Petroleum Geology, 2003, 25(1):94-96.
- [16] 陈刚,戴俊生,叶兴树,等.生长指数与断层落差的对比研究[J].西南石油大学学报,2007,29(3):21-23.

CHEN Gang, DAI Junsheng, YE Xingshu, et al. The comparative study between growth index and fault fall [J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(3):21-23.

[17] 林玉祥,吴玉琛,栾伟娜,等. 沁南地区寺头断裂在天然气运聚中的作用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2015,34(6):1-8.

LIN Yuxiang, WU Yuchen, LUAN Weina, et al. Control effect of Sitou fault on natural gas migration and accumulation in Qinnan field[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015,34(6):1-8.

[18] 姚益民,徐道一,张海峰,等. 山东东营凹陷新生代天文底层表简介[J]. 地层学杂志,2007,31(增Ⅱ):423-429.

YAO Yimin, XU Daoyi, ZHANG Haifeng, et al. A brief introduction to the Cenozoic astrostratigraphic time scale for the Dongying depression, Shandong[J]. Journal of Stratigraphy, 2007,31(sup Ⅱ):423-429.

(编辑 徐会永)