

doi:10.3799/dqkx.2011.113

基于层序地层学和地震沉积学的高精度三维沉积体系： 以渤中凹陷西斜坡 BZ3-1 区块东营组为例

朱红涛^{1,2}, 杨香华^{1,2}, 周心怀³, 李建平³, 王德英³, 李敏^{1,2}

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452

摘要: 基于层序地层学、地震沉积学理论及三维可视化技术, 结合 3D 高分辨率地震资料, 对渤中凹陷西斜坡 BZ3-1 区块东营组层序进行高精度三维沉积体系分析。研究将东营组古沟谷分为 V 型、U 型、W 型及复合型 4 种类型, 并详细刻画不同类型、不同期次的古沟谷从上游一下游的分叉、汇合的充填特征及其从发育—消亡的不同时期演化特征。研究区地震多属性异常区域在平面上多紧靠断层的下降盘, 呈规模不一的扇状展布。结合测井曲线、岩心、地震相、地震多属性特征等分析可知, 东营组层序沉积相类型分为扇三角洲、辫状河三角洲、滨浅湖, 同时对不同相带边界进行了定量厘定。高精度三维沉积体系分析结果表明, 由于三级层序发育于二级层序的不同体系域, 会导致三级层序的体系域沉积体发育特征产生不同。SQd₃ 层序发育于二级层序的低位体系域, 其低位体系域的扇体规模要远远大于高位体系域的扇体; SQd₂ 层序发育于二级层序的水进体系域, 其低位体系域三角洲朵体规模与高位体系域的三角洲朵体相当; SQd₁ 层序发育于二级层序的高位体系域, 其高位体系域三角洲朵体规模远远大于低位体系域的三角洲朵体。

关键词: 层序地层学; 地震沉积学; 东营组; 古沟谷; 沉积相。

中图分类号: P539.2; P65

文章编号: 1000-2383(2011)06-1073-12

收稿日期: 2011-04-15

High Resolution Three-Dimensional Facies Architecture Delineation Using Sequence Stratigraphy, Seismic Sedimentology: Example from Dongying Formation in BZ3-1 Block of Western Slope of Bozhong Sag, Bohai Bay Basin

ZHU Hong-tao^{1,2}, YANG Xiang-hua^{1,2}, ZHOU Xin-huai³, LI Jian-ping³, WANG de-ying³, LI Min^{1,2}

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. China National Offshore Oil Corporation Limited-Tianjin, Tianjin 300452, China

Abstract: Based on sequence stratigraphy, seismic sedimentology theory and 3D visualization technology, High resolution three-dimensional facies architecture was described in detail using the recent 3D seismic data of Dongying Formation of BZ3-1 Block, western slope of Bozhong sag. The paleo-channels of Dongying formation could be subdivided into four types including type V, U, W and Compound, and were delineated the branching and converging infilling characteristics from up-stream to down-stream and the evolution stage from occurrence to extinction. Normally, Fan-shaped abnormal areas of seismic multi-attributes were located in the footwall of faults. On the basis of an integrated analysis of well log and core data, seismic facies, seismic multi-attribute, the sedimentary facies of sequences of Dongying formation were found to include fan-delta, braided river delta and coast-shallow lake, and the boundaries of these facies were crystallized quantitatively. The results of high resolution three-dimensional sedimentary systems analysis show that the third-order sequence located in different system tracts of second-order sequence could be lead to their system tracts with the different sedimentary types and scale. Because sequence SQd₃ belong to

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40702024); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. CUGL100412); 教育部留学回国人员科研启动基金(No. 2009022014)。

作者简介: 朱红涛(1976—), 男, 副教授, 博士后, 主要从事层序地层学、地震沉积学与地震资料综合解释。E-mail: zhuht_oscar@yahoo.com.cn

the lowstand system tracts of second-order sequence, and the fan scale of lowstand system tracts of sequence SQd_3 was larger than that of its highstand system tracts'; Sequence SQd_2 is located in the transgressive system tracts of second-order sequence, and the delta scale of lowstand system tracts of sequence SQd_2 was equal to that of its highstand system tracts'; Sequence SQd_1 developed in the highstand system tracts of second-order sequence, and the delta scale of lowstand system tracts of sequence SQd_1 was less than that its highstand system tracts'.

Key words: sequence stratigraphy; seismic sedimentology; Dongying Formation; paleo-channel; sedimentary facies.

0 引言

层序地层学已经被证实是一种有效的理论方法,广泛应用于海相盆地(Mitchum and van Wag-
oner,1991;Posamentier and Vail,1988)和陆相盆地
(Paul and Marriott, 1993; Shanley and McCabe,
1994; 姜在兴和李华启, 1996; 樊太亮和李卫东,
1999; 李思田等, 2002; Zaitlin *et al.*, 2002; 林畅松
等, 2004; 顾家裕和张兴阳, 2005; Escalona and
Mann, 2006; 邓宏文等, 2008; 纪友亮等, 2008; 郑
荣才等, 2009)的层序分析、沉积充填过程及其沉积
相时空分布、等时地层格架内的生—储—盖组合的
油藏描述. 地震沉积学是建立在地球物理学、沉积
学、地震地层学、层序地层学等基础上的一门新学
科,并越来越受到人们的关注. 作为地震沉积学的主
要代表人,美国德克萨斯大学研究员 Zeng Hongliu
博士在 1998 年首次提出了“地震沉积学”一词
(Zeng *et al.*, 1998),并将“地震沉积学”定义为利
用地震资料来研究沉积岩及其形成过程的一门学科
(Zeng and Hentz, 2004),地震岩石学和地震地貌
学组成其核心内容. 地震沉积学概念的提出及推广,
使得提取地震资料中蕴含的地震信息的研究系统
化. 朱筱敏(2009)认为地震沉积学是以现代沉积学
和地球物理学为理论基础,利用三维地震资料,经过

层序地层、地震属性分析和地层切片,研究地层岩石
宏观特征、沉积结构、沉积体系、沉积相平面展布以
及沉积发育史的地质学科. 目前在国际上已经掀起了
地震沉积学的研究热潮, Zeng *et al.* (1996,
2001)、Zeng (2001)、Zeng and Kerans (2003) 和
Zeng and Hentz(2004)对北美、印度等含油气盆地
进行了一系列的地震沉积学研究,并在油气勘探和
开发方面取得了明显的效果. 我国学者也对有关地
震沉积学的问题进行了探讨(董春梅等, 2006; 林
承焰和张宪国, 2006; 林承焰等, 2007)和实践研究
(董艳蕾等, 2008a, 2008b; 李秀鹏等, 2008; 李斌
等, 2009; 张义娜等, 2009; Huang *et al.*, 2009). 随
着高密度三维地震技术的进一步发展和完善,地震
沉积学必将成为继地震地层学、层序地层学之后一
门研究沉积地质体三维几何形态、内部结构和沉积
过程的新学科.

渤海湾盆地是我国最重要的一个含油气盆地,
经过多年的勘探取得了一系列的勘探成果及学术认
识(池英柳等, 2000; 何仕斌等, 2001; 侯贵廷等,
2001; 刘晓峰等, 2008; 朱伟林等, 2008; Zhu
et al., 2008; Hao *et al.*, 2009a, 2009b). 就其研
究程度而言,该盆地具有陆上拗陷高于海域拗陷、古
近系高于新近系、古近系沙河街组高于东营组的特
点. 由于受到地震资料(二维测线)、钻井资料(井少)

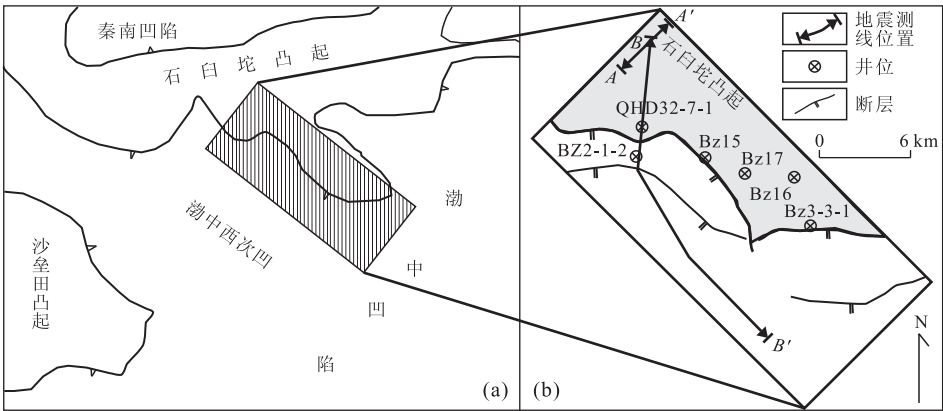


图 1 BZ3-1 区块构造位置示意

Fig. 1 The BZ3-1 block, western slope of Bozhong sag showing distribution of faults and locations of wells, seismic lines

的影响,渤海海域坳陷的沉积相的研究多为宏观的区域性研究(邓宏文等, 2001; 赵国连和赵澄林, 2002; 赵国连等, 2005; 冯有良和徐秀生, 2006; 吴磊等, 2006; 周士科等, 2006; 徐长贵等, 2008), 这成为渤海海域坳陷储层精细解释的主要瓶颈。

渤中西环 BZ3-1 区块位于渤海湾渤中凹陷西部斜坡带上, 北部紧邻石臼坨凸起, 研究工区面积约 700 km² (图 1)。研究区钻井较少, 且集中分布在石臼坨凸起上, 钻遇层位主要为东营组, 极少钻遇沙河街组。仅仅依靠有限的钻井资料, 无法满足研究区无井、少井控制区域的储层预测, 只有充分发挥地震资料的优势, 开展地震沉积学研究。因此, 本文基于渤中坳陷西环今年最新采集、处理的三维地震资料, 应用层序地层学、地震沉积学理论, 结合地球物理技术方法, 对 BZ3-1 区块进行高精度三维沉积体系分析, 取得更为精细的沉积体系的时空分布及演化成果。

1 研究区层序划分及特征

中国东部中生代断陷盆地一般都经历了从早期的裂陷到晚期的裂后坳陷阶段的演化, 但裂陷阶段往往是幕式进行的。第三纪渤海湾盆地的裂陷过程也具有多幕的特征, 古近纪经历过孔店期、沙四期、沙三期、东营期 4 期的裂陷幕(林畅松等, 2000), 研究区目的层东营组为第 IV 期裂陷期。

古近系东营组可以分为 4 个三级层序(图 2),

自下而上分别为 SQd₃、SQd₂¹、SQd₂²、SQd₁ 层序, 它们构成一个完整的二级层序。本次研究重点探讨 SQd₃、SQd₂¹、SQd₂² 3 个层序, 它们组成一个由初始裂陷期—强烈裂陷期—裂陷萎缩期的完整构造均幕旋回, 在岩性组合上均具有由细到粗的变化规律。

SQd₃ 层序, 大致相当于东三段地层。层序底界面为局部不整合面(上超面), 顶界面为局部不整合面 T₃^u。层序构型具有 LST+TST 为主、HST 为辅的特征, 对应的长期旋回是以上升半旋回为主不对称性旋回。该层序为断陷 IV 幕开始, 构造沉降速率大, 新增的可容纳空间大于沉积物供应量, 处于一种欠补偿的沉积环境, 钻井揭示的岩性多为厚层深灰色泥岩, 灰质、白云质泥岩夹浅灰、灰白色砂岩, 粉砂岩。

SQd₂¹ 层序, 大致相当于东二下地层。层序底界面为局部不整合面 T₃^u, 顶界面为典型上超面 T₃^u。层序构型具有 LST+TST 与 HST 厚度相当的特征, 对应的长期旋回是一对称性旋回。该层序处于断陷 IV 幕的强烈断陷阶段, 层序分布范围广、厚度大, 前积地震相特征明显, 岩性为浅灰、灰白色砂岩, 粉砂岩与深灰、灰绿色泥岩, 泥质粉砂岩不等厚互层。

SQd₂² 层序, 大致相当于东二上地层。层序底界面为典型上超 T₃^u, 顶界面为局部上超面 T₃^u。层序构型具有 HST 为主, LST+TST 为辅的特征, 对应的长期旋回是为下降半旋回为主的不对称性旋回。该层序对应于断陷 IV 幕的萎缩期, 新增可容纳空间小于沉积物供应量, 处于一种过补充的沉积环境, 发育

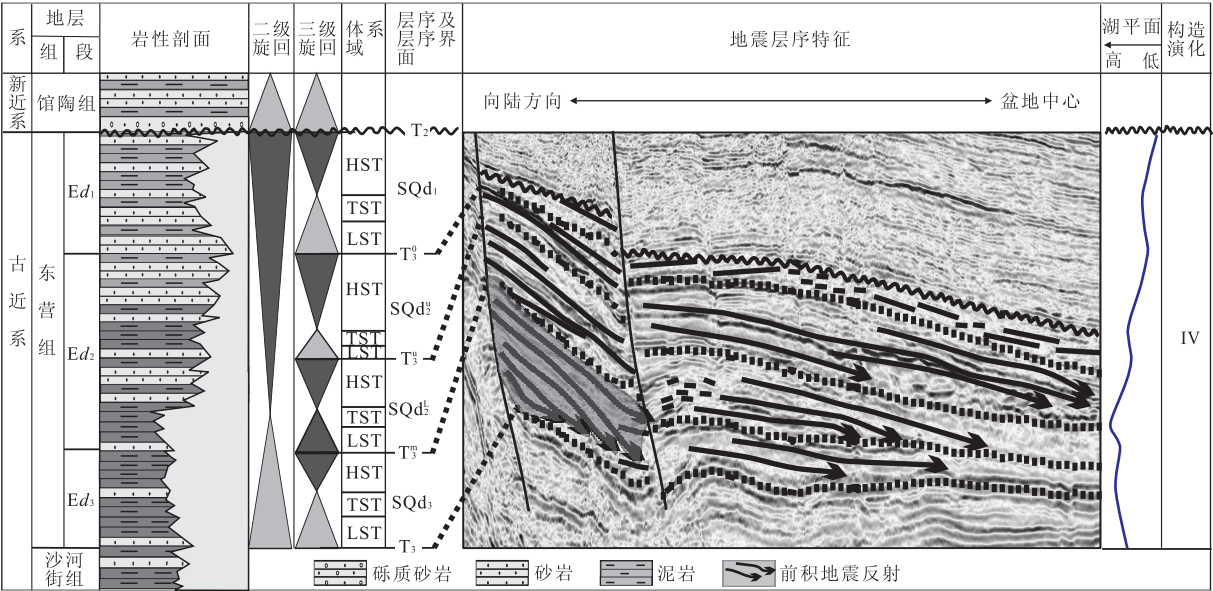


图 2 BZ3-1 区块东营组层序充填序列和构造演化

Fig. 2 Generalised stratigraphic column and tectonic evolution in the Dongying Formation of study area

不同规模的三角洲沉积,前积地震相特征明显.

SQd₁ 层序,大致相当于东一段地层. 底界面为局部上超面 T₃⁰,顶界面古、新近系之间的区域不整合面 T₂. 此层序为开始断拗转换的过渡期. 本次研究不作为重点探讨.

2 研究区古沟谷类型及时空展布

古沟谷是在基准面下降到坡折点之下,地表遭受剥蚀形成的,一般沿层序界面发育,多出现在盆地边缘或古隆起上. 古沟谷是向盆地沉积区输送沉积物的重要搬运通道,其本身也通常被砂质沉积物充填,往往具有非常典型的双向上超充填结构的地震相特征. 因此,识别古沟谷不仅可以判断物源方向及其控制的物源分散体系格局,而且其本身也可作为储集体.

2.1 古沟谷类型及特征

根据沟谷的空间几何形态,渤中西环 BZ3-1 区在石臼坨凸起上共发育 V 型、U 型、W 型及复合型 4 种古沟谷类型(图 3). V 型沟谷为河流发育初期,即河流幼年期以侵蚀下切作用为主,代表了水动力最强的河道形态,河道分支少,携砂能力强,所携带的沉积物颗粒大小不一,磨圆度差,分选不好;U 型为河流壮年期的沟谷形态,分为沉积物垂向叠加和侧向叠加两种类

型,侧向叠加反映了古沟谷不断发生侧向迁移,以及河道的频繁迁移,垂向叠加反映了稳定的河道沉积物充填,U 型河道输砂能力最强,并且离物源区有一定的距离,颗粒大小、磨圆度及分选均较好;W 型沟谷多为河道晚期分叉期形成的,水动力进一步减弱后形成的河道形态特征,W 型沟谷输砂能力弱,携带颗粒大小较为均一的细粒沉积物,磨圆度高,分选好. 在平面上,从物源区到盆地,河道的形态具有依次从 V 型、U 型、W 型转化的特征.

2.2 古沟谷时空展布

在 BZ3-1 西北部的石臼坨凸起上发育大量南北向的古沟谷,在垂直古水流方向上的地震测线 XLN3200 上共发育 6 期规模大小不一、相互切割叠置的 U 型沟谷,这些古沟谷均出现地形下凹,在下凹地形中地层厚度明显大于两侧,甚至可见到双向上超充填结构地震相(图 4).

为了更好地体现古沟谷的时空展布特征,基于地震沉积学地层切片技术和三维可视化技术对古沟谷精细刻画. 图 5 为古沟谷三维空间变化特征,底面平面图为东营组底界面(T₃)的反射振幅,右侧剖面为地震测线 ILN 867,保持不变,通过改变古沟谷上游到下游方向的地震测线 XLN3200-3150-3070-3030 这 4 条剖面来指示古沟谷的空间变化特征.

图 5a 中,地震测线 XLN3200 剖面上,发育有 6 期古沟谷,沟谷具有较小的宽厚比,表明沟谷下切能力很强,水动力大;东营组底界面(T₃)的反射振幅平面图上,自北向南,可以看到多条与 XLN3200 剖面上的 6 期古沟谷相对应的强振幅异常条带,并伴随分叉、汇合现象,指示这 6 期古沟谷在 T₃ 时期的平面形态变化;图 5b 中,地震测线为 XLN3150,由于多期古沟谷汇合,剖面上共发育 4 期古沟谷,宽厚比增大,表明古沟谷的下切能力减弱,水动力也有所减弱;图 5c 中,地震测线为 XLN3070,古沟谷汇合、消亡,剖面上共发育 3 期古沟谷,剖面上充填的古沟谷和平面上的强振幅异常条带具有很好的对应关系,宽厚比进一步增大,水动力继续减弱;图 5d 中,地震测线为 XLN3030,继承了图 5c 的特征,发育有 3 期古沟谷,只是宽厚比进一步增大,水动力逐步消亡.

图 6 显示的是古沟谷三维时间变化特征,保持地震剖面 XLN3200 和右侧地震剖面 ILN867 的测线位置不变,通过提取东营组底界面(T₃)(图 6a)、东营组顶界面(T₂)(图 6d)及其东营组内部的沿层切片(图 6b,6c)的反射振幅平面图,指示古沟谷在

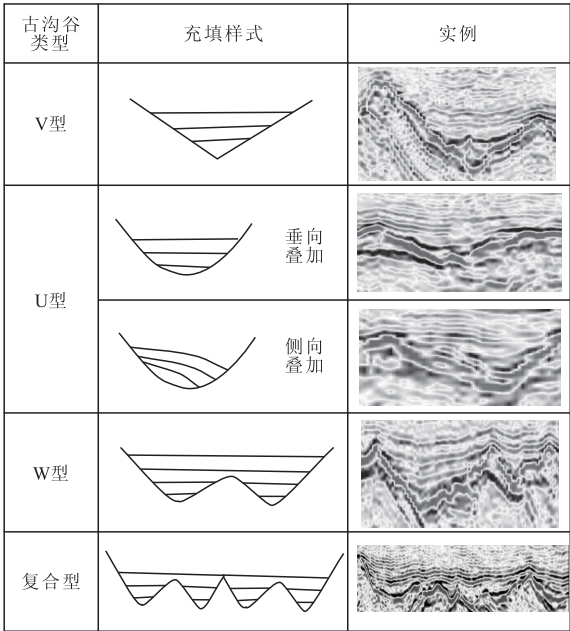


图 3 研究区东营组古沟谷类型
Fig. 3 Types of paleo-channel of the Dongying Formation of study area

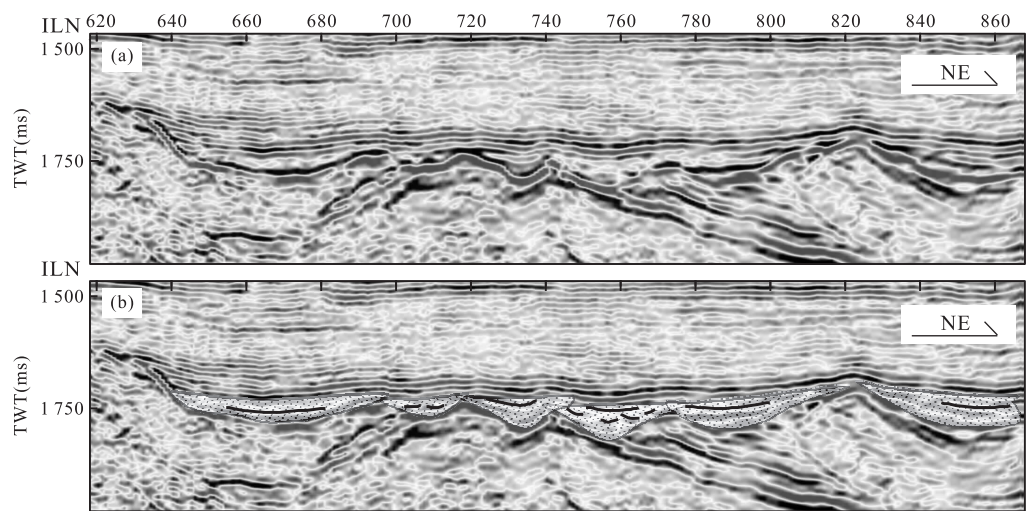


图 4 研究区石臼坨凸起上地震测线 AA' 指示的古沟谷充填特征(测线位置见图 1AA')

Fig. 4 Paleo-channel infill seismic facies characteristics of seismic cross section AA', Shijiutuo uplift

a. 未解释原始剖面;b. 古沟谷及地震相解释剖面

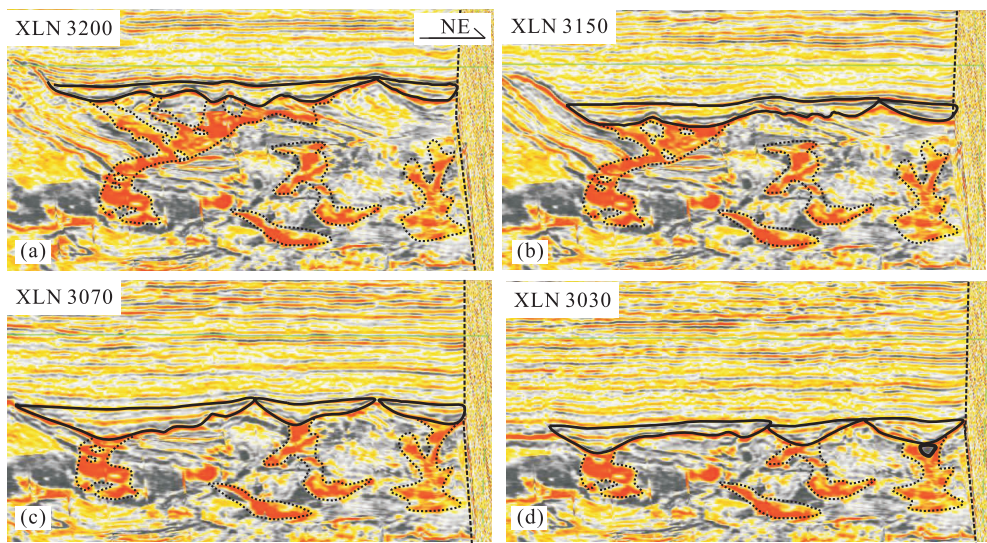


图 5 研究区石臼坨凸起上不同 XLN 地震测线指示的古沟谷 3D 空间变化特征

Fig. 5 Seismic cross section XLN3200—3030 of Shijiutuo uplift showing 3D spatial characteristics of paleo-channel in study area

实线. 地震剖面上的河道充填形态;虚线. 地层切片上的河道平面展布形态

不同时期的迁移变化规律。

东营组底界面(T_3)的反射振幅平面图上(图 6a),具有多条较宽的强振幅异常条带,分支少,侧向迁移规模小,表明该时期是古沟谷初始发育期,以侵蚀下切的 V 型古沟谷为主,水动力较强,河道直,分支少;图 6b 中,强振幅异常条带明显变多、变窄,弯曲度增大,表明该时期古沟谷以 U 型为主,侵蚀下切能力减弱,古沟谷出现分支、弯曲、频繁迁移等特征;图 6c 中,强振幅异常条带变得更细、更多、弯曲度更大,表明古沟谷处于晚期,多为 W 型沟谷,分支最多,侧向迁移规模大,代表了水动力进一步减弱后

的古沟谷形态;东营组顶界面(T_2)的反射振幅平面图上(图 6d),强振幅异常条带已经不明显,表明古沟谷进入消亡、萎缩期,逐步准平原化。

研究区石臼坨凸起的侵蚀古沟谷与下游沉积区的扇体或三角洲朵体具有对应关系,凸起上有剥蚀,下部必然有扇体沉积;大型沟谷规模大,长期侵蚀,沟谷出口处沉积体系继承性发育,对应大型扇体;小型沟谷侵蚀时间短,对应小型扇体。石臼坨凸起发育上述大量大型古沟谷,沉积区也必然会发育大量的扇体或三角洲朵体。

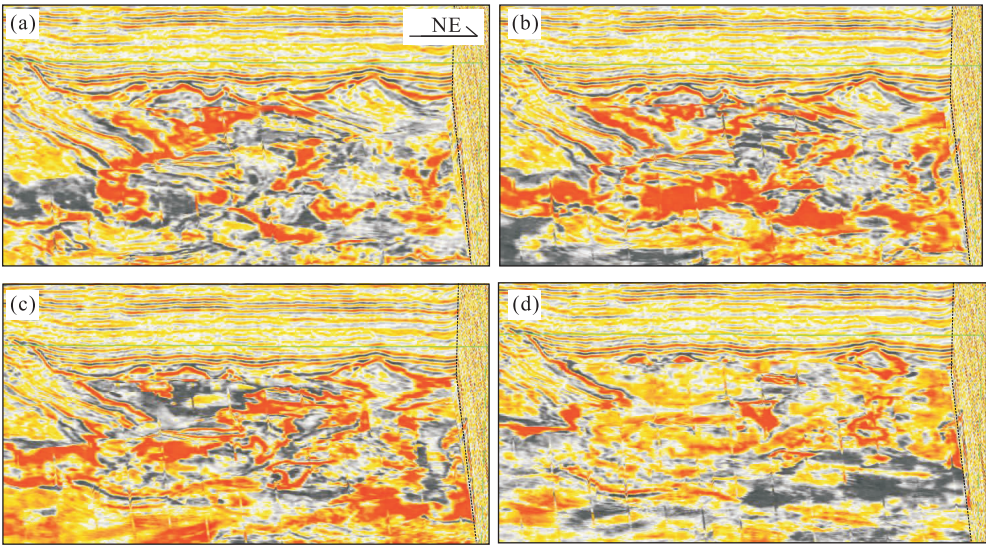


图 6 研究区不同时期的顺层切片指示的古沟谷 3D 变化特征
Fig. 6 Stratral slice showing 3D characteristics of different stage of paleo-channel in study area

3 基于地震多属性的沉积体系分析

作为储层预测主要技术的地震属性已由原来的单属性分析,发展到地震多属性分析阶段,大大提高预测精度,有效的消除了地震单属性分析具有的不确定性、多解性(张建宁和于建国, 2006),提高了属性分析的效率.地震多属性综合分析方法是在地震属性敏感性分析的基础上,选取优化后的地震属性组合,运用神经网络等多种算法对多个单属性进行拟合,实现多种单属性信息融合,利用拟合后的多属性地震相图结合钻井可进行沉积相分析并且可以对储层的发育状况展开综合预测.

通过研究区单属性的相关分析,分别提取 SQd_3 、 SQd_2 、 SQd_1 3 个三级层序的 BW、IF、RMS 3 种单属性,并拟合成地震多属性平面图(图 7a、图

9a、图 10a). 其中,多属性异常可以分为 3 种类型,分别以红色、黄色和天蓝色表示,红色代表富砂沉积,黄色富砂程度次之,天蓝色表示富泥沉积.在此基础上,结合地震相特征,进行地震相向沉积相的转换.

3.1 SQd_3 层序的地震多属性、沉积相特征

东营组 SQd_2 层序处于二级层序的低位体系域,为区域断陷Ⅳ幕的开始强烈断陷期,研究区石臼坨凸起部分露出水面,成为物源区,沉积物局部分布.

由研究区东营组 SQd_3 层序的地震多属性平面图(图 7a)可知,红色、黄色异常平面上多呈规模不一的扇状展布,并紧靠断层的下降盘. 其中,黄色异常区多分布在红色异常区的周缘,表明红色部分为主体富砂沉积区,黄色部分为砂岩相对发育区;广泛分布的蓝色区域为泥岩相对发育区. 此外,在蓝色背景中还存在一些孤立的黄色区域,可能为“泥包砂”

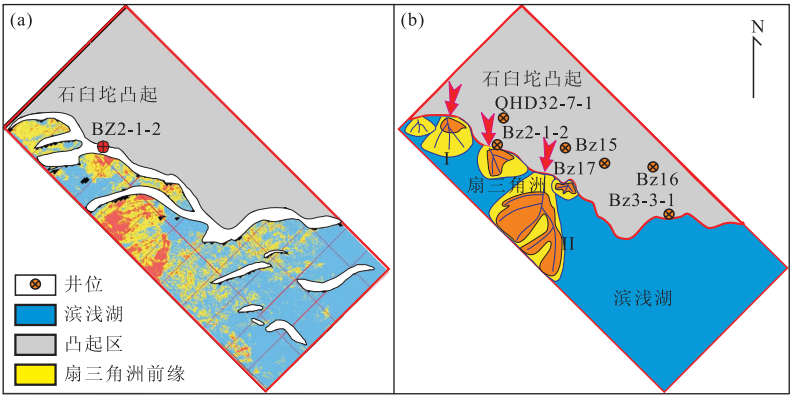


图 7 SQd_3 层序地震多属性和沉积相平面
Fig. 7 Seismic multi-attributes and sedimentary facies of sequence of SQd_3

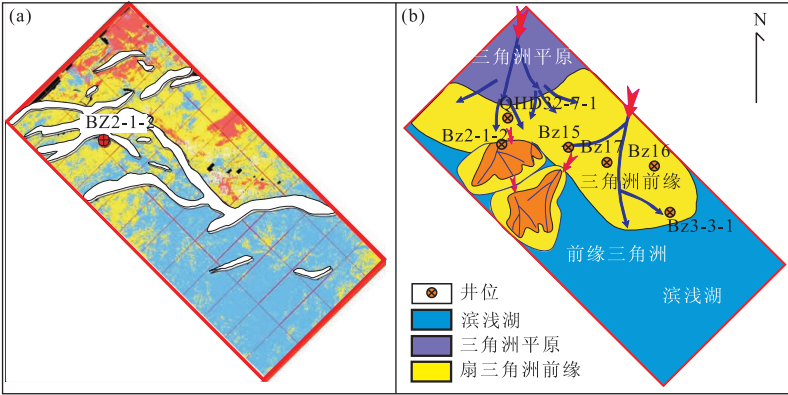


图 9 SQ_{d2} 层序地震多属性和沉积相平面

Fig. 9 Seismic multi-attributes and sedimentary facies of sequence of SQ_{d2}

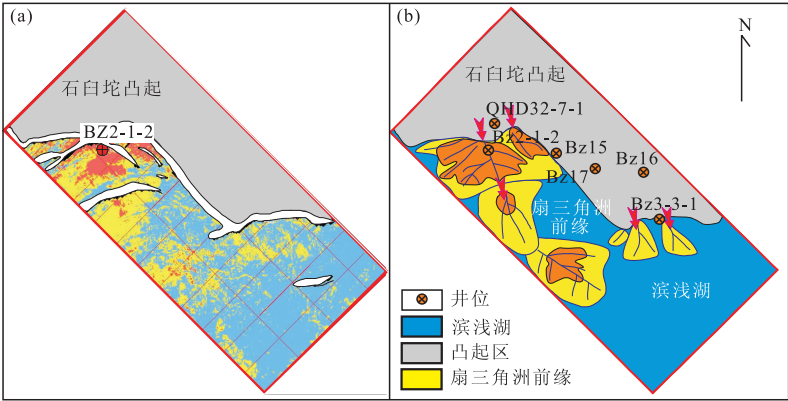


图 10 SQ_{d3} 层序地震多属性和沉积相

Fig. 10 Seismic multi-attributes and sedimentary facies of sequence of SQ_{d3}

的扇状展布,并紧靠断层的下降盘(图 10a). 其中,黄色异常区多分布在红色异常区的周缘,表明红色部分为主体富砂沉积区,黄色部分为砂岩相对发育区;广泛分布的蓝色区域为泥岩相对发育区. 此外,靠近物源区主控断层下降盘的三角洲朵体以红色为主,远离物源区的局部断层下降盘二次沉积的三角洲朵体以黄色异常为主,表明自北向南扇体富砂程度的变化.

BZ2-1-2 井处主要发育辫状河三角洲前缘、滨浅湖一半深湖沉积,第二次取心段呈典型的反粒序沉积组合,指示为河口坝亚相(图 8),结合地震多属性异常厘定的沉积相带边界可知,SQ_{d2} 层序主要发育三角洲、滨浅湖一半深湖沉积,其中,三角洲前缘部分具有 2 次沉积朵体(图 10b).

图 11 是过图 7~9 中扇体及三角洲朵体的典型剖面,在断层的下降盘可见典型的前积反射特征,自下而上,多期扇体依次前积,SQ_{d2} 层序前积规模、展布范围最大. 虽然 3 个层序都具有典型的前积反射

特征,但是它们的地震相存在一定的差别,SQ_{d3} 层序为弱振幅、中一低连续、高角度前积地震相特征,SQ_{d2} 层序为中振幅、中连续、前积地震相特征,SQ_{d1} 层序为强振幅、高连续、前积地震相特征.

4 高精度沉积体系时空演化

东营组 SQ_{d3} 层序处在二级旋回的低位体系域,沉积物沉积范围较小,主要集中在断层的下降盘;SQ_{d2} 层序处在二级旋回的水进体系域,湖平面持续上升,沉积物分布最广;SQ_{d1} 层序处在二级层序的高位体系域,湖平面持续下降,沉积物沉积范围再次减小.

高精度三维沉积体系分析结果表明,由于三级层序发育于二级层序的不同体系域,会导致三级层序的体系域沉积体发育特征的不同.

图 12 中 SQ_{d3} 层序的低位体系域扇体主要发育在Ⅱ区,水进体系域扇体不发育,高位体系域主要

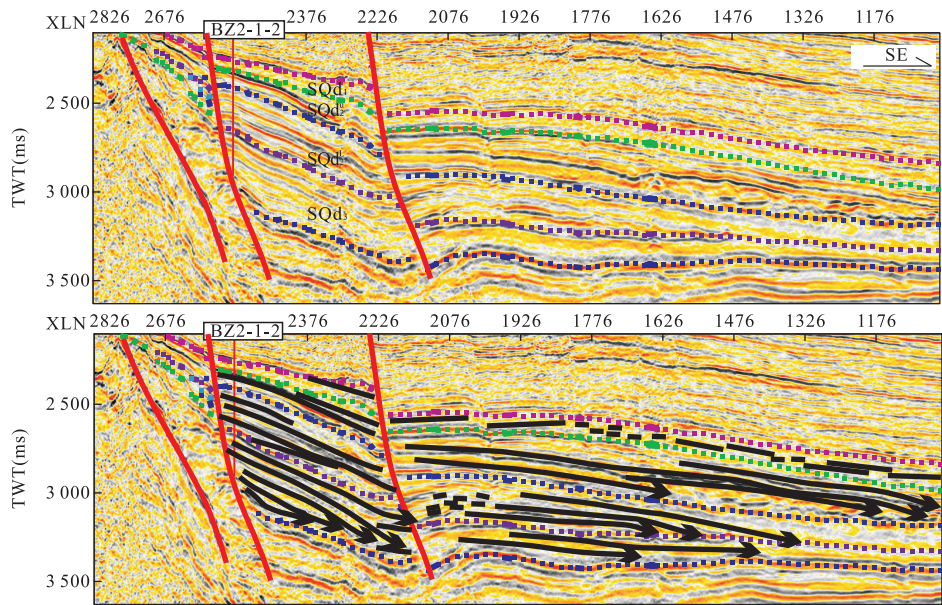


图 11 地震测线 BB' 指示的东营组层序扇三角洲朵体地震相、沉积相(测线位置见图 1BB')

Fig. 11 Seismic cross section BB' showing seismic facies and sedimentary facies of fan-delta of Dongying Formation in the study area

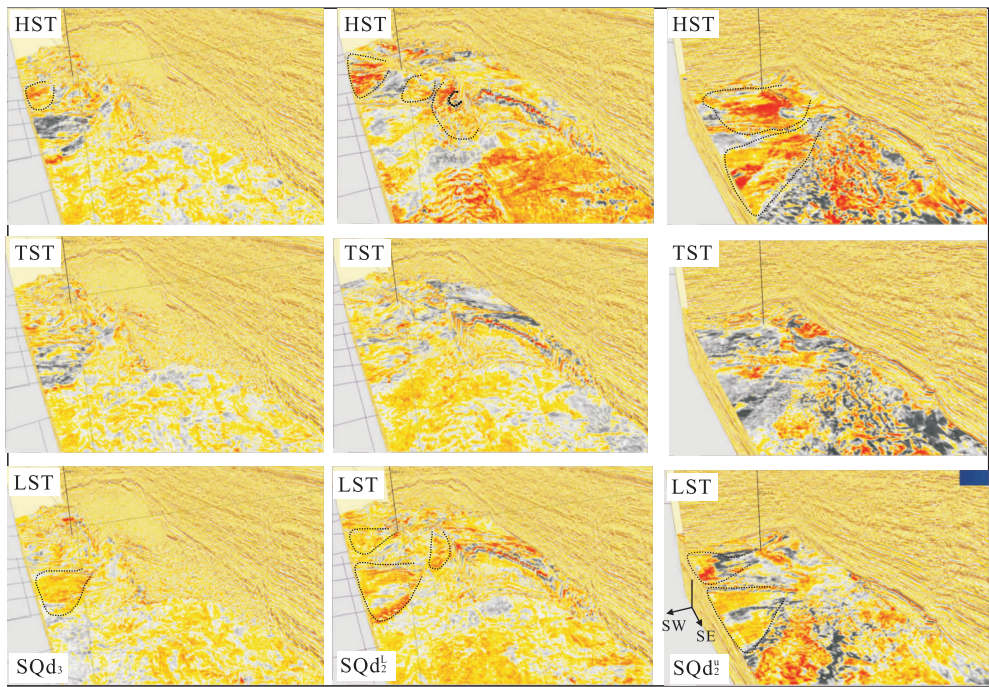


图 12 研究区东营组层序 LST-HST 振幅切片指示的扇体时空分布特征

Fig. 12 Seismic amplitude slice of LST-HST of Sequence, Dongying Formation, showing the spatial and temporal distribution of fan

发育在Ⅰ区,但是Ⅱ区扇体规模远远大于Ⅰ区扇体规模.因为SQd₃层序处在二级旋回的低位体系域,以基准面上升半旋回为主,该层序的低位体系域沉积占主体,所形成的扇体规模要远远大于高位体系域的扇体.

图 12 中 SQd₂ 层序的低位体系域和高位体系域

发都发育三角洲朵体,而且两者规模相当,水进体系域三角洲朵体不发育.因为 SQd₂ 层序处在二级旋回的水进体系域,基准面旋回为对称半旋回,该层序的低位体系域与高位体系域三角洲朵体规模相当.

图 12 中 SQd₂ 层序的低位体系域、高位体系域三角洲朵体规模最大,高位体系域三角洲朵体规模

要明显大于低位体系域,水进体系域三角洲朵体不发育。因为 SQd₂ 层序处在二级旋回的高位体系域,以基准面下降半旋回为主,高位体系域沉积占主体。

References

- Chi, Y. L., Yang, C. Y., Zhou, J. S., 2000. Cenozoic faulting and its Influence on the formation of petroleum systems in Bohai Bay basin. *Petroleum Explorationist*, 5 (3): 41—48 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H. W., Guo, J. Y., Wang, R. J., et al., 2008. Tectono-sequence stratigraphic analysis in continental faulted basins. *Earth Science Frontiers*, 15 (2): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Deng, H. W., Wang, H. L., Wang, D. Z., 2001. Control of paleo-morphology to stratigraphic sequence in continental rift basins; take Lower Tertiary of western slope in Bozhong depression as an example. *Oil & Gas Geology*, 22 (4): 293—296 (in Chinese with English abstract).
- Dong, C. M., Zhang, X. G., Lin, C. Y., 2006. Conception, method and technology of the seismic sedimentology. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24 (5): 698—704 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y. L., Zhu, X. M., Zeng, H. L., et al., 2008a. Seismic sedimentology study on Shayi sequence in Qinan sag, Huanghua depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26 (2): 234—240 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y. L., Zhu, X. M., Zeng, H. L., et al., 2008b. Study of seismic sedimentology in Qinan sag. *Journal of China University of Petroleum (Science & Technology Edition)*, 32 (4): 7—12 (in Chinese with English abstract).
- Escalona, A., Mann, P., 2006. Sequence-stratigraphic analysis of Eocene clastic foreland basin deposits in central Lake Maracaibo using high-resolution well correlation and 3-D seismic data. *AAPG Bulletin*, 90 (4): 581—623. doi:10.1306/10130505037
- Fan, T. L., Li, W. D., 1999. A successful case on sequence stratigraphy applied to the prediction of non-marine oil reservoir. *Acta Petrolei Sinica*, 20 (2): 12—17 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. L., Xu, X. S., 2006. Syndepositional structural slope-break zone controls on lithologic reservoirs—a case from Paleogene Bohai Bay basin. *Petroleum Exploration and Development*, 33 (1): 22—25 (in Chinese with English abstract).
- Gu, J. Y., Zhang, X. Y., 2005. Sedimentary characteristics and sequence framework of intracontinental foreland basin in the western China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23 (2): 187—193 (in Chinese with English abstract).
- Hao, F., Zhou, X. H., Zhu, Y. M., et al., 2009a. Charging of the Neogene Penglai 19-3 field, Bohai Bay basin, China: oil accumulation in a young trap in an active fault zone. *AAPG Bulletin*, 93 (2): 155—179. doi:10.1306/09080808092
- Hao, F., Zhou, X. H., Zhu, Y. M., et al., 2009b. Mechanisms for oil depletion and enrichment on the Shijiutuo uplift, Bohai Bay basin, China. *AAPG Bulletin*, 93 (8): 1015—1037. doi:10.1306/04140908156
- He, S. B., Zhu, W. L., Li, L. X., 2001. Sedimentary evolution and Neogene reservoir-seal assemblage analysis of Bozhong depression. *Acta Petrolei Sinica*, 22 (2): 38—43 (in Chinese with English abstract).
- Hou, G. T., Qian, X. L., Cai, D. S., 2001. The tectonic evolution of Bohai basin in Mesozoic and Cenozoic time. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 37 (6): 845—851 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H. D., Zhang, R. W., Luo, Q., et al., 2009. Subtle trap recognition based on seismic sedimentology—a case study from Shengli oilfield. *Applied Geophysics*, 6 (2): 175—183. doi:10.1007/s11770-009-0015-0
- Ji, Y. L., Zhang, S. W., Wang, Y. S., et al., 2008. The relationship between the scales of petroleum collective system and the scales of sequence boundary. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26 (4): 617—623 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Li, H. Q., 1996. The principles and application of sequence stratigraphy. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Li, B., Song, Y., He, Y. P., et al., 2009. Discussion and application of seismic sedimentology. *Acta Geologica Sinica*, 83 (6): 820—826 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. T., Pan, Y. L., Lu, Y. C., et al., 2002. Key technology of prospecting and exploration of bubble traps in lacustrine fault basins. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27 (5): 592—598 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. P., Zeng, H. L., Zha, M., 2008. Mapping deltaic depositional systems using seismic sedimentology. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 35 (6): 625—629 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Zhang, Y. M., Li, S. T., et al., 2004. Episodic rifting dynamic process and quantitative model of Mesozoic-Cenozoic faulted basins in Eastern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29 (5): 583—588 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Pan, Y. L., Xiao, J. X., et al., 2000. Structural slope-break zone; key concept for stratigraphic sequence analysis

- and petroleum forecasting in fault subsidence basins. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25 (3): 260—266 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. Y., Zhang, X. G., Dong, C. M., 2007. Concept of seismic sedimentology and its preliminary application. *Acta Petrolei Sinica*, 28(2): 69—72 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. Y., Zhang, Y. G., 2006. The discussion of seismic sedimentology. *Advances in Earth Science*, 21 (11): 1140—1144 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. Z., Bao, Z. D., Wang, Y. M., 2008. Characteristics of valley-slope break zone in the western slope of Songliao basin and its control over reservoir distribution. *Journal of China University of Petroleum (Science & Technology Edition)*, 32(6): 12—16 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. F., Xie, X. N., Zhang, C., 2008. Characteristics and generation of the reservoir overpressure in Bozhong depression, Bohai Bay basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(3): 337—341 (in Chinese with English abstract).
- Mitchum, R. M., Van Wagoner, J. C., 1991. High-frequency sequences and their stacking patterns: sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles. *Sedimentary Geology*, 70(2—4): 131—147, 153—160. doi: 10.1016/0037-0738(91)90139-5
- Paul, W., V., Marriott, S. B., 1993. The sequence stratigraphy of fluvial depositional systems: the role of floodplain sediment storage. *Sedimentary Geology*, 86(3—4): 203—210. doi: 10.1016/0037-0738(93)90022-W
- Posamentier, H. W., Vail, P. R., 1988. Eustatic controls on clastic deposition: II—Sequence and systems tract models. In: Wilgus, C. H., Hastings, B. S., Kemdall, C. G. S. C., eds., Sea-level changes—an integrated approach. *SEPM Special Publication*, 42: 125—154. doi: 10.2110/pec.88.01.0125
- Shanley, K. W., McCabe, P. J., 1994. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. *AAPG Bulletin*, 78(4): 544—568. doi: 10.1306/BDF9258-1718-11D7-8645000102C1865D
- Wu, L., Xu, H. M., Ji, H. C., 2006. Evolution of sedimentary system and analysis of sedimentary source in Paleogene of Bozhong sag, Bohai Bay. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(1): 81—88 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. G., Yu, S., Lin, C. S., et al., 2008. Structural styles of the Paleogene lacustrine basin margin and their control on sedimentary sequences in Bohai Sea area. *Journal of Palaeogeography*, 10(6): 627—635 (in Chinese with English abstract).
- Zaitlin, B. A., Warren, M. J., Potocki, D. J., et al., 2002. Depositional styles in a low Accommodation Foreland basin setting: an example from the Basal Quartz (Lower Cretaceous), southern Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 50(1): 31—72. doi: 10.2113/50.1.31
- Zeng, H. L., 2001. From seismic stratigraphy to seismic sedimentology: a sensible transition. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 51: 413—420. doi: 10.1306/2DC40D01-0E47-11D7-8643000102C1865D
- Zeng, H. L., Backus, M. M., Barrow, K. T., et al., 1996. Facies mapping from three-dimensional seismic data: potential and guidelines from a tertiary sandstone-shale sequence model, Powderhorn Field, Calhoun County, Texas. *AAPG Bulletin*, 80(1): 16—46. doi: 10.1306/64ED8732-1724-11D7-8645000102C1865D
- Zeng, H. L., Henry, S. C., Riola, J. P., 1998. Stratal slicing: part II, real 3-D seismic data. *Geophysics*, 63(2): 514—522. doi: 10.1190/1.1444352
- Zeng, H. L., Hentz, T. F., 2004. High-frequency sequence stratigraphy from seismic sedimentology: applied to Miocene, Vermilion Block 50, Tiger shoal area, offshore Louisiana. *AAPG Bulletin*, 88(2): 153—174. doi: 10.1306/10060303018
- Zeng, H. L., Hentz, T. F., Wood, L. J., 2001. Stratal slicing of Miocene-Pliocene sediments in vermilion block 50-tiger shoal area, offshore Louisiana. *The Leading Edge*, 20(4): 408—418. doi: 10.1190/1.1438962
- Zeng, H. L., Kerans, C., 2003. Seismic frequency control on carbonate seismic stratigraphy: a case study of the Kingdom Abo sequence, West Texas. *AAPG Bulletin*, 87(2): 273—293. doi: 10.1306/08270201023
- Zhang, J. N., Yu, J. G., 2006. The indetermination analysis on the seismic attribution application. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 45(4): 373—379 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. N., Zhu, X. M., Liu, C. L., 2009. Seismic sedimentology and its application in south of Central Asia. *Petroleum Exploration and Development*, 36(1): 74—79 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. L., Zhao, C. L., 2002. Study on the seismic-sedimentary facies of the Bozhong subsidence. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 29(1): 41—48 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, G. L., Zhao, C. L., Ye, L. J., 2005. Sedimentary system of “four fans and one channel” in the Bohai Gulf basin and its significance for petroleum exploration. *Journal of Geomechanics*, 11(3): 245—258 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, R. C., Dai, C. C., Zhu, R. K., et al., 2009. Sequence-based lithofacies and paleogeographic characteristics of Upper Tri-

- assic Xujiache Formation in Sichuan basin. *Geological Review*, 55(4): 484—495 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S. K., Wei, Z. D., Deng, H. W., et al., 2006. A study on Paleogene tectonic sequences in Bozhong sag. *China Offshore Oil and Gas*, 18(4): 236—240 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H. T., Du, Y. S., Liu, K. Y., et al., 2008. Sequence stratigraphic delineation and correlation of the Dongying Formation in the nearshore and adjacent sea areas, Bohai Bay basin. *Journal of Earth Science*, 19(1): 54—64. doi:10.1016/S1002-0705(08)60024-2
- Zhu, W. L., Li, J. P., Zhou, X. H., et al., 2008. Neogene shallow water deltaic system and large hydrocarbon accumulations in Bohai Bay, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(4): 575—582 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. M., Liu, C. L., Zhang, Y. N., et al., 2009. On seismic sedimentology of lacustrine deltaic depositional systems. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 915—921 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 池英柳, 杨池银, 周建生, 2000. 渤海湾盆地新生代断裂活动与含油气系统形成. 勘探家, 5(3): 41—48.
- 邓宏文, 郭建宇, 王瑞菊, 等, 2008. 陆相断陷盆地的构造层序地层分析. 地学前缘, 15(2): 1—7.
- 邓宏文, 王红亮, 王敦则, 2001. 古地貌对陆相裂谷盆地层序充填特征的控制——以渤中凹陷西斜坡区下第三系为例. 石油与天然气地质, 22(4): 293—296.
- 董春梅, 张宪国, 林承焰, 2006. 地震沉积学的概念、方法和技术. 沉积学报, 24(5): 698—704.
- 董艳蕾, 朱筱敏, 曾洪流, 等, 2008a. 黄骅坳陷歧南凹陷古近系沙一层序地震沉积学研究. 沉积学报, 26(2): 234—240.
- 董艳蕾, 朱筱敏, 曾洪流, 等, 2008b. 歧南凹陷地震沉积学研究. 中国石油大学学报(自然科学版), 32(4): 7—12.
- 樊太亮, 李卫东, 1999. 层序地层应用于陆相油藏预测的成功实例. 石油学报, 20(2): 12—17.
- 冯有良, 徐秀生, 2006. 同沉积构造坡折带对岩性油气藏富集带的控制作用——以渤海湾盆地古近系为例. 石油勘探与开发, 33(1): 22—25.
- 顾家裕, 张兴阳, 2005. 中国西部陆内前陆盆地沉积特征与层序格架. 沉积学报, 23(2): 187—193.
- 何仕斌, 朱伟林, 李丽霞, 2001. 渤中坳陷沉积演化和上第三系储盖组合分析. 石油学报, 22(2): 38—43.
- 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升, 2001. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究. 北京大学学报(自然科学版), 37(6): 845—851.
- 纪友亮, 张善文, 王永诗, 等, 2008. 断陷盆地油气汇聚体系与层序地层格架之间的关系研究. 沉积学报, 26(4): 617—623.
- 姜在兴, 李华启, 1996. 层序地层学原理及应用. 北京: 石油工业出版社.
- 李斌, 宋岩, 何玉萍, 等, 2009. 地震沉积学探讨及应用. 地质学报, 83(6): 820—826.
- 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等, 2002. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术. 地球科学——中国地质大学学报, 27(5): 592—598.
- 李秀鹏, 曾洪流, 查明, 2008. 地震沉积学在识别三角洲沉积体系中的应用. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(6): 625—629.
- 林畅松, 张燕梅, 李思田, 等, 2004. 中国东部新生代断陷盆地幕式裂陷过程的动力学响应和模拟模型. 地球科学——中国地质大学学报, 29(5): 583—588.
- 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等, 2000. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析与油气预测的重要概念. 地球科学——中国地质大学学报, 25(3): 260—266.
- 林承焰, 张宪国, 董春梅, 2007. 地震沉积学及其初步应用. 石油学报, 28(3): 69—72.
- 林承焰, 张宪国, 2006. 地震沉积学探讨. 地球科学进展, 21(11): 1140—1144.
- 刘桂珍, 鲍志东, 王英民, 2008. 松辽盆地西斜坡古沟谷一坡折带特征及其对储层分布的控制. 中国石油大学学报(自然科学版), 32(6): 12—16.
- 刘晓峰, 解习农, 张成, 2008. 渤海湾盆地渤中坳陷储层超压特征与成因机制. 地球科学——中国地质大学学报, 33(3): 337—341.
- 吴磊, 徐怀民, 季汉成, 2006. 渤海湾盆地渤中凹陷古近系沉积体系演化及物源分析. 海洋地质与第四纪地质, 26(1): 81—88.
- 徐长贵, 于水, 林畅松, 等, 2008. 渤海海域古近系湖盆边缘构造样式及其对沉积层序的控制作用. 古地理学报, 10(6): 627—635.
- 张建宁, 于建国, 2006. 地震属性应用中的不确定性分析. 石油物探, 45(4): 373—379.
- 张义娜, 朱筱敏, 刘长利, 2009. 地震沉积学及其在中亚南部地区的应用. 石油勘探与开发, 36(1): 74—79.
- 赵国连, 赵澄林, 叶连俊, 2005. 渤海湾盆地“四扇一沟”沉积体系及其油气意义. 地质力学学报, 11(3): 245—258.
- 赵国连, 赵澄林, 2002. 渤中凹陷地震—沉积相研究. 成都理工大学学报, 29(1): 41—48.
- 郑荣才, 戴朝成, 朱如凯, 等, 2009. 四川类前陆盆地须家河组层序—岩相古地理特征. 地质论评, 55(4): 484—495.
- 周士科, 魏泽典, 邓宏文, 等, 2006. 渤中凹陷古近系构造层序研究. 中国海上油气, 18(4): 236—240.
- 朱伟林, 李建平, 周心怀, 等, 2008. 渤海新近系浅水三角洲沉积体系与大型油气田勘探. 沉积学报, 26(4): 575—582.
- 朱筱敏, 刘长利, 张义娜, 等, 2009. 地震沉积学在陆相湖盆三角洲砂体预测中的应用. 沉积学报, 27(5): 915—921.