

文章编号: 0253-2697(2015)12-1531-12 DOI:10.7623/syxb201512007

# 北黄海盆地下白垩统层序构成特点及控制因素

王 任<sup>1</sup> 石万忠<sup>1,2</sup> 肖 丹<sup>1</sup> 夏 飞<sup>1</sup> 夏治旻<sup>1</sup> 徐清海<sup>1</sup>

(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)

**摘要:**北黄海盆地下白垩统属于湖相沉积。通过钻井及高精度三维地震资料可以清楚地在下白垩统下部地层中识别出层序的低位体系域、水进体系域、高位体系域、初次水进面以及最大洪泛面的特征。低位体系域包括下切谷、低位进积楔以及低位扇;高位体系域被层序顶界面及最大洪泛面所限定,并以发育有进积型准层序组为特征;水进体系域位于低位体系域与高位体系域中间,以退积型准层序组为主要特征。通过地质分析可以概括出层序发育的主要控制因素:①根据火成岩测试年龄及地震解释成果认为,晚侏罗世晚期—早白垩世早期岩浆活动造成地层抬升减薄,导致了构造坡折带的形成。②基于坡折带以上 4 口井的岩性资料发现,水进体系域和高位体系域沉积夹杂有红色泥岩。地震剖面显示层序顶界面超覆于底界面之上,层序分布范围明显小于其上覆和下伏层序的范围,同时在坡折带以下地区识别出了低位扇体和进积楔。以上证据表明该时期湖平面下降至坡折带以下地区且沉积中心发生迁移。③地震资料所显示的斜坡扇沉积,岩心资料所证实的砾石颗粒支撑和泥质充填、泥砾的存在以及录井岩性所显示的高含砂量(60%~70%)均显示出早白垩世早期为持续大物源供给。因此,控制北黄海盆地下白垩统层序形成的 3 个控制因素可以概括为构造坡折带的形成、湖平面的下降以及大物源的供给。

**关键词:**层序构成;控制因素;构造坡折;下白垩统;北黄海盆地

中图分类号:TE121 文献标识码:A

## Architecture characteristics and control factors of Lower Cretaceous sequence in North Yellow Sea Basin

Wang Ren<sup>1</sup> Shi Wanzhong<sup>1,2</sup> Xiao Dan<sup>1</sup> Xia Fei<sup>1</sup> Xia Zhimin<sup>1</sup> Xu Qinghai<sup>1</sup>

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Lower Cretaceous sediments in North Yellow Sea Basin show lacustrine facies. Based on drilling and high-precision 3D seismic data, the sequence characteristics, such as lowstand system tract, transgressive system tract, highstand system tract, initial transgressive surface and maximum flooding surface, can be clearly identified from the bottom of Lower Cretaceous strata. The lowstand system tract includes incised valley, lowstand progradational wedge and lowstand fans. The highstand system tract is not only confined by sequence top surface and maximum flooding surface, but also characterized by the development of progradational parasequence set. The transgressive system tract is located between lowstand system tract and highstand system tract, primarily characterized by retrogradational parasequence set. The following major control factors can be concluded through geological analysis: (1) According to the test ages of igneous rocks and seismic data interpretation, it is considered that magmatic activities from the late period of Late Jurassic to the early period of Early Cretaceous resulted in the strata uplifting and thinning, leading to the formation of structural slope-break belt. (2) Based on the lithologic data of four wells above the slope-break belt, it is found that the sediments in transgressive and highstand system tracts contain red mudstones. Seismic profiles indicate that the sequence top surface is overlapping bottom surface, and distribution range of the sequence is significantly smaller than that of overlying and underlying sequences. Meanwhile, the lowstand fan and progradational wedge can be clearly identified beneath the structural slope-break belt. These evidences prove that the lake level dropped down to the area beneath the structural slope-break belt, and the sedimentary center migrated in this period. (3) Persistent large provenance supply in the early period of Early Cretaceous is revealed through the slope fan identified by seismic data, the gravel grain support and the existence of muddy fillings and boulder clay confirmed by core data, as well as the higher sand content (60%-70%) verified by logging lithology. Therefore, three control factors for the formation of Lower Cretaceous sequence in North Yellow Sea Basin can be summarized as the generation of structural slope-break belt, lake-level drop and large provenance supply.

**Key words:** sequence architecture; control factors; structural slope-break belt; Lower Cretaceous; North Yellow Sea Basin

**基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 40602015)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(cug130104)资助。

**第一作者:**王 任,男,1990 年 12 月生,2013 年获中国地质大学(武汉)学士学位,现为中国地质大学(武汉)资源学院硕士研究生,主要从事层序地层学、岩性油气藏勘探的研究工作。Email:leoren1282@126.com

**通信作者:**石万忠,男,1973 年 1 月生,1996 年获中国地质大学(武汉)学士学位,2006 年获中国地质大学(武汉)博士学位,现为中国地质大学(武汉)资源学院教授、博士生导师,主要从事层序地层学、成藏动力学及页岩气的研究工作。Email:shiwz@cug.edu.cn

引用:王任,石万忠,肖丹,夏飞,夏治旻,徐清海. 北黄海盆地下白垩统层序构成特点及控制因素[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1531-1542.

Cite: Wang Ren, Shi Wanzhong, Xiao Dan, Xia Fei, Xia Zhimin, Xu Qinghai. Architecture characteristics and control factors of Lower Cretaceous sequence in North Yellow Sea Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1531-1542.

经典海相层序在世界范围内被广泛研究,主要是因海平面周期性波动、区域构造沉降以及沉积物的供给这三者综合影响了可容纳空间的变化,从而控制了层序的堆积样式,形成了海相层序。层序地层学理论于20世纪80年代初期被中国学者引进和应用。根据中国油气资源主要富集于陆相盆地之中这一特点,李思田率先提出了完全不同于海相层序的陆相层序地层学<sup>[1]</sup>。同时 Posamentier 对加拿大阿尔伯塔东卡里的现代小型湖泊扇三角洲的详细观察证实,层序地层学理论亦可应用于湖泊环境之中<sup>[2,2]</sup>。随后,中国学者分别从层序形成的控制因素、层序界面、体系域特征方面论述了陆相盆地层序地层学研究的特殊性,并针对中国中生代、新生代湖盆的特征,从沉积盆地的构造和边缘背景对海相层序地层学的影响出发,讨论了湖水面相对变化、沉积物供给、气候等对陆相层序地层的控制作用,明确指出海相层序地层学不能够简单套用于中国陆相盆地<sup>[4,5]</sup>。魏魁生以中国部分陆相盆地为重点研究对象,探讨了层序地层学在陆相湖盆中的应用,描述了层序内部各体系域及沉积体系的发育特征,提出了类海相层序的非海相沉积层序地层发育的理想模式,并与 Vail 模式进行比较<sup>[6-8]</sup>;胡授权、陈飞分别对南襄盆地泌阳断陷双河—赵凹地区古近系及鄂尔多斯盆地上三叠统发育的体系域进行研究,均发现了陆相层序的存在<sup>[9,10]</sup>。

在海相盆地中,层序被其顶、底界面、初次海泛面及最大海泛面分隔为3个体系域,从下到上依次为低位体系域(LST)、海侵体系域(TST)、高位体系域(HST)。其中完整的低位体系域包括有海底扇、斜坡扇、低位进积楔;海侵体系域由一套退积型准层序组构成;高位体系域则由一套加积或进积型准层序组构成<sup>[2,11,12]</sup>。陆相盆地中,在层序的关键界面及沉积体系域的划分及命名上,不同学者观点存在差异,一些学者基本沿用海相层序沉积体系的“三分法”和名称术语,即层序顶、底界面、初次水进面、最大洪泛面把层序划分为低位体系域、水进体系域及高位体系域3部分<sup>[6,7,13]</sup>;另一些学者则认为“三分法”仅适用于一定条件,应该利用沉积体系组合特征来命名体系域类型,如沉积扇—浅水湖盆型体系域、扇三角洲—较深水湖盆型体系域等<sup>[1,4,14]</sup>;更有学者提出利用层序的顶、底界面、最大洪泛面、凝缩段底界面、初次水进面把湖相层序划分为无湖岸上超的低位体系域、湖岸显著上超的水进体系域、湖相加积型高位体系域及湖岸显著退却

湖退体系域的“四分法”<sup>[9,15-17]</sup>。通过对北黄海盆地下白垩统陆相层序的研究,并结合可操作性以及实际性原则,笔者采用海相层序沉积体系的“三分法”。

在控制层序发育的主要因素方面,不同于海相盆地<sup>[11,18,19]</sup>,陆相湖盆因其本身具有物源多且近、沉降中心多且迁移性强、相带窄且变化快、湖盆规模小且变化大、受构造活动影响大等原因导致了控制因素具有复杂性的特征<sup>[20]</sup>。研究发现,陆相层序普遍受构造活动的控制较为明显<sup>[13-16,18-28]</sup>,构造特征直接控制了沉积充填特征<sup>[24-26]</sup>。对于不同陆相盆地,构造对层序的控制作用往往也有一定差异<sup>[28,29]</sup>。因此,建立不同构造背景下陆相盆地层序地层模式和适应大多数陆相盆地的层序地层系统是当前该领域重要工作之一,也是陆相层序地层学的发展趋势。笔者以陆相层序地层学理论为指导,基于井-震资料及区域地质背景对发育在北黄海盆地下白垩统的层序进行精细刻画,发现有完整的陆相层序存在。通过识别各体系域特征并描述其内部组成,结合构造及沉积背景,分析层序形成的主控因素,提出岩浆活动构造背景下层序的发育模式,试图为陆相盆地层序的发育提供一个实例,为陆相层序地层学理论的研究及进一步的油气勘探提供思路。

## 1 区域地质概况

在大地构造位置上,北黄海盆地位于华北板块向东部海区的延伸部分,西临郯庐断裂带和渤海湾盆地,北部为辽东隆起,东部为朝鲜北部地块,南接胶东隆起和苏胶—临津江碰撞造山带<sup>[30]</sup>[图1(a)]。北黄海盆地是发育于华北地台的中生代—新生代陆相断陷盆地,经历了多期断陷活动与构造反转的复杂演化过程,研究区受拉张应力作用明显,区内广泛发育正断层,逆断层较少,岩浆活动频繁。其内部发育多个次级构造单元,由西至东分布有金星坳陷、水星隆起、木星坳陷、火星隆起、土星隆起、天王星坳陷、海王星隆起,整个地区呈现出隆-坳相间分布的特征[图1(b)]。木星坳陷是北黄海盆地中最大的坳陷,可进一步划分为8个次级构造单元[图1(b)]。研究区处于木星坳陷中部,包括木IV构造带及木V凹陷[图1(c)]。根据北黄海盆地所处的大地构造位置、构造变形和沉积充填特征,结合板块运动和区域构造演化史,初步将北黄海盆地的构造演化分为4个阶段,即裂前阶段、中生代断陷—反转阶段、古近纪断陷—反转阶段以及新近纪区域沉降阶段<sup>[31,32]</sup>(图2)。

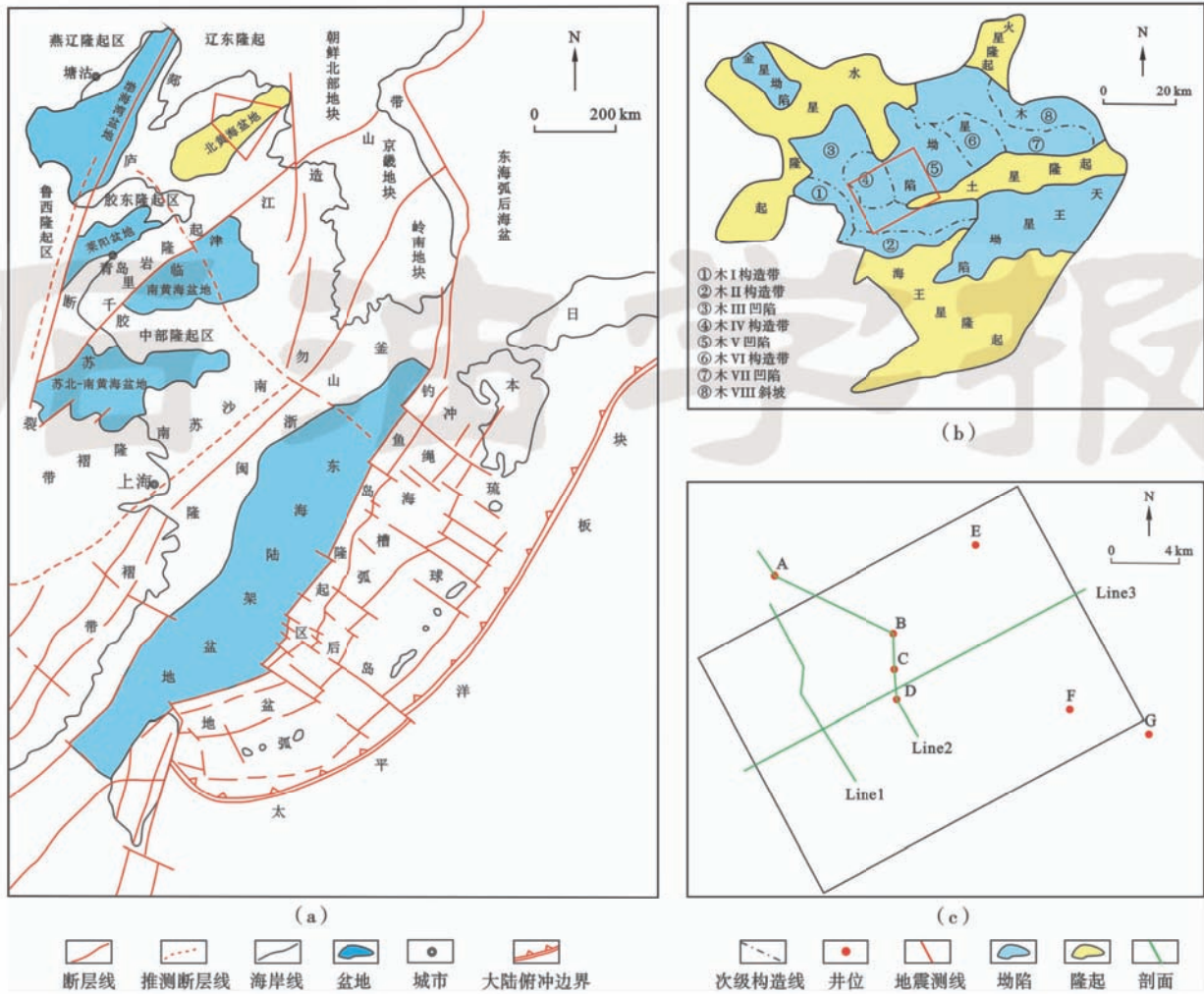


图 1 研究区大地构造位置(图 1(a)据文献[30]修改)

Fig. 1 Tectonic location of study area

北黄海盆地自中侏罗世开始沉降并接受沉积,先后经历了中侏罗世(201.3~163.5 Ma)、晚侏罗世(163.5~145 Ma)、白垩纪(145~66 Ma)、古近纪(66~23.03 Ma)、新近纪和第四纪(23.3~0 Ma)等多个沉积阶段。白垩系和侏罗系界线在中国东部地区尚未有明确的标准(多在 135~145 Ma 进行讨论),因此本文地层年龄采用 IUGS2014 版进行标注<sup>[33]</sup>。中生界地层发育 J<sub>2</sub>SQ1—K<sub>1</sub>SQ5 共 9 套层序,其下白垩统下部的 K<sub>1</sub>SQ1 层序可以识别出典型陆相层序,是本文研究的重点层序<sup>[34]</sup>(图 2)。

在晚侏罗世—渐新世期间,盆地均接受陆相沉积,其下白垩统中上部发育湖相暗色泥岩、上侏罗统中部发育湖相黑色泥岩及煤层,为主力烃源层;上侏罗统中部及下白垩统下部发育厚层砂体,为优质储层(图 2)。在不同发育阶段盆地的范围、沉积相类型与分布、沉积体系及其发育规模都不尽相同。不同阶段的沉积相和沉积体系的变化,反映了北黄海盆地发育过程和沉积环境的演化。

## 2 层序构成特征

### 2.1 关键界面的识别

关键界面是指层序的顶、底界面以及初次水进面和最大洪泛面,这 4 个界面控制分隔了层序的低位体系域、水进体系域和高位体系域。笔者通过井-震标定、地震反射特征描述以及地震相分析能够识别出这 4 个关键界面<sup>[35,36]</sup>(图 3、图 4、图 5),并且这 4 个关键界面在研究区能够闭合解释。

层序的底界面(T5)是一强振幅、高连续反射界面,是该区的标志层,低位进积楔下超于该界面之上(图 3、图 4)。录井岩性及取心观察都显示该界面以下的上侏罗统泥岩为灰色或灰黑色,岩性组合主要为厚层泥岩夹薄层粉砂岩,以半深湖—深湖相沉积为主(图 2、图 5);界面以上的下白垩统地层岩性组合为厚层粗砂岩或砾岩与薄层泥岩的不等厚互层,且泥岩颜色主体为紫红色,为河流、湖泊相沉积(图 5)。

层序的顶界面(T44)为一强反射、高连续界面,高

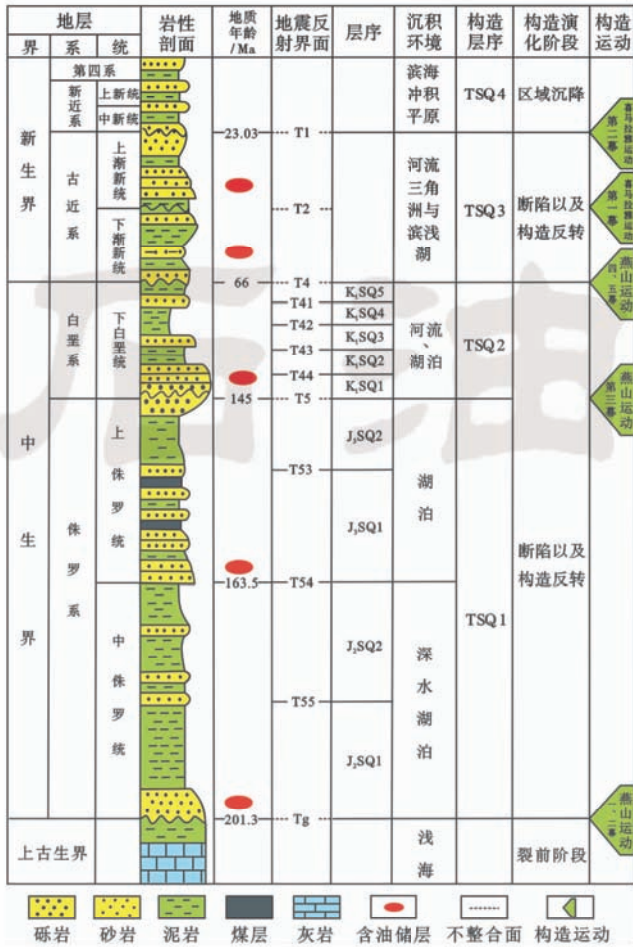


图2 北黄海盆地地层综合柱状图(据文献[33]修改)  
Fig.2 Stratigraphic histogram of North Yellow Sea Basin

位体系域的前积反射层向上顶超于该界面(图3、4)。录井岩性及电测曲线显示该界面以下岩性组合为厚层粗砂岩或砾岩与薄层泥岩不等厚互层为主,在C井段为粗砾岩段的底界面(图5)。

初次水进面(TS)是分隔低位体系域与水进体系域的界面。图3显示该界面为一顶超面,低位进积楔顶超于该面之上,该界面能够被准确识别并进行闭合解释。

最大洪泛面(MFS)是分隔水进体系域与高位体系域的分界面,其最显著的特征是高位体系域沉积的下超面(图3、图4),因此能够在地震资料上准确识别并进行闭合解释。

基于各关键界面的识别结果,并结合连井地质剖面可以概括出层序的钻井特征:A井、B井、C井、D井均位于陆架坡折以上地区,自A井到D井,各井水进体系域部分含砂量明显减少,泥质含量明显增加。同时A井、B井显示出粒度自下而上逐渐变细的正粒序特征,为水进体系域退积型准层序组的显著纵向特征,代表砂体自盆地中心向盆地边缘方向退积的过程,此时沉积中心位于近物源区;随着后期沉降速率变缓,相对湖平面上升速率变缓,导致了碎屑沉积物沿构造斜坡沉积,并逐步向盆地中心推进,形成了进积型准层序组,相应地,沉积中心向盆地中心迁移(图5)。

2.2 体系域的识别

2.2.1 低位体系域特征

低位体系域发育于构造坡折带及以下地区,与水

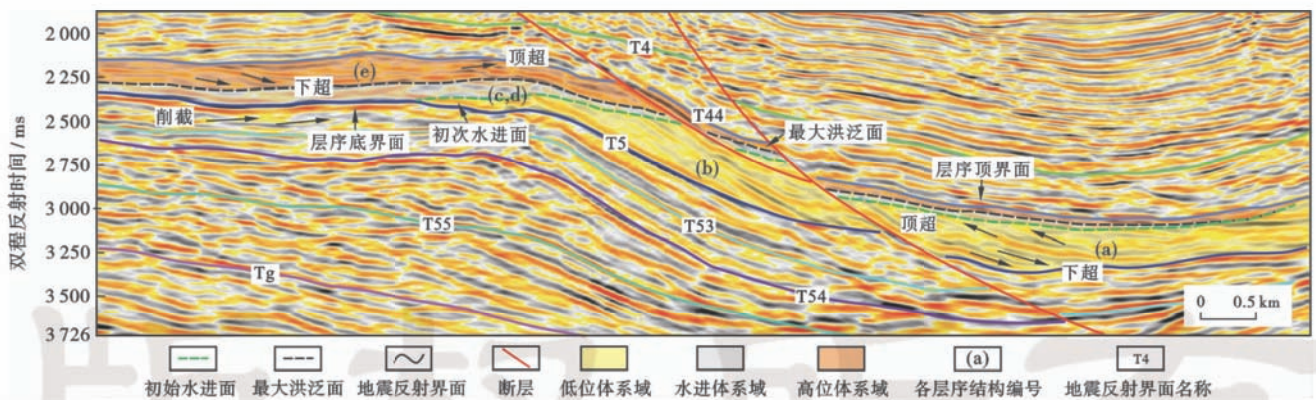


图3 北黄海盆地层序关键界面及各体系域识别(地震测线 Line1)  
Fig.3 Identification of key surfaces and system tracts in North Yellow Sea Basin(Seismic Line 1)

进体系域以初始水进面分隔。在研究区主测线方向上截取的三维地震测线 Line1 清楚地显示出低位体系域的各个构成单元(图3、图4):

低位进积楔:低位进积楔在有的文献中也被称为低位三角洲,该结构在低位体系域中反射最为清楚[图4(a)],其中最主要的识别标志即为明显的前积结构。同时,进积楔大部分下超于层序的底界面,一部分

下超在斜坡扇之上,在近端顶超于初次水进面,地震相由近源至远源呈现出中频至低频的变化,反映其近源的砂、泥互层的浊积岩沉积、远源的富泥质沉积。

斜坡扇:发育在盆地斜坡带和层序的底界面之上,在地震剖面上呈现出远端下超、近端湖岸上超的特征,其内部为弱振幅的杂乱反射,同向轴连续性较差,该丘形反射就是斜坡扇[图4(b)]。斜坡扇为重力流快速

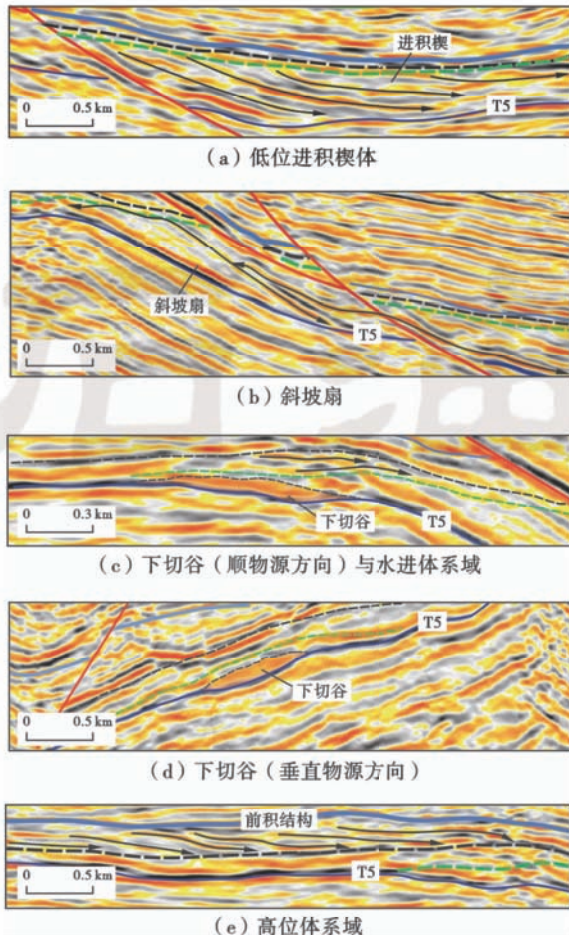


图 4 北黄海盆地层序构型精细刻画

Fig. 4 Precise description of sequence architecture in North Yellow Sea Basin

堆积的产物。

下切谷:是在湖平面下降、河流向盆地延伸并侵蚀下伏地层的深切河流体系及其充填物,是沉积物搬运的主要物源通道,连接物源区与低位扇体。该结构在地震剖面上表现为小型凹槽[图 4(c)、图 4(d)],凹槽内充填陆源富砂碎屑沉积物。

### 2.2.2 水进体系域特征

水进体系域是位于高位体系域与低位体系域之间的部分,夹于初次水进面与最大洪泛面之间。典型的水进体系域呈退积式准层序叠加样式,一般形成于水平面上升阶段,这是其最大特征。虽然层序内可观察到的水进体系域较薄且反射特征不是特别明显,但仍然可以依据最大洪泛面和初次水进面的识别来划分出水进体系域[图 4(c)]。

### 2.2.3 高位体系域特征

高位体系域为最大洪泛面与层序的顶界面所夹持的部分,形成于湖平面上升末期。在顺物源的方向发育有明显的前积结构,前积层下超于最大洪泛面之上[图 4(e)]。通过高位体系域精细刻画、Line3 连井地

质剖面以及连井地震剖面对比分析可以发现,高位前积砂体的地震相呈现出强振幅、中频、同向轴连续性强的特征,在地震剖面上显示出明显的前积结构,反映为扇三角洲前缘朵体间富砂沉积。同时连井地质剖面表现出水进体系域至高位体系域沉积时期,沉积中心位置向盆地中心迁移的特征(图 5)。

### 2.3 层序结构特征

前述依据井-震资料共识别出下白垩统  $K_1$  SQ1 层序的 4 个关键界面和 3 个体系域,层序的顶、底界面、初次水进面和最大洪泛面从下向上把层序分为低位体系域、水进体系域和高位体系域。低位体系域发育于坡折带以下地区,依据地震资料反射特征能够进一步识别出低位扇、下切谷和低位进积楔,其中低位进积楔具有向上顶超向下下超的特征。高位体系域具有明显的前积反射特征,呈现前积式准层序组,以最大洪泛面与下伏的水进体系域分隔。水进体系域位于高位体系域与低位体系域之间,以初次水进面和最大洪泛面分隔。经过地震资料精细解释,发现初次水进面主要分布在研究区的南部、陆架坡折带之下,而最大洪泛面在整个地区都有分布,但在坡折带以下由于水平面的快速上升和物源的大规模进积,使得水进体系域沉积非常薄以及初次水进面和最大洪泛面几乎重合(图 3)。

从以上层序的构成特征来看,研究区所识别出的  $K_1$  SQ1 层序具有完整的陆相层序特征。

## 3 体系域发育控制因素

构造活动是被学者普遍接受的控制湖相层序发育的重要因素<sup>[21-28,37-40]</sup>,然而不同背景条件下的沉积盆地其层序的发育应当有所区别,可能是由某单一因素主要控制,也有可能是几种因素联合起主要作用<sup>[21-28]</sup>。北黄海盆地为我国东部近海陆相湖盆,经研究发现,仅在研究区内的斜坡处  $K_1$  SQ1 层序内部具有完整陆相层序的构成样式,其他层序不具有如此典型的特征,表明其形成具有一定的特殊性,其控制因素需要进一步分析。

### 3.1 坡折带的形成

$K_1$  SQ1 层序沉积时期,无重大的构造运动,其顶界面为连续沉积面,不存在地层的剥蚀现象,且  $K_1$  SQ1 层序为补偿性稳定沉积,故其厚度变化能够反映其沉积的古地貌特征。为反映研究区的古地貌特征,笔者编制了 6 个层序的厚度图(图 6)。

钻井资料显示 T5 界面下部以灰色厚层泥岩夹薄层砂岩为主,界面上部为厚层砂岩夹薄层红色泥岩,且 A 井、B 井在层序底界面存在底砾岩,岩性发生泥岩至砾岩的突变,表明该时期发生过较强的剥蚀作用导致了地层的缺失(图 5);同时钻井底砾岩标定下的 T5 界

面上、下地层产状不一致,且在地震剖面上显示出“上超下削”的接触特征,因此认为上侏罗统与下白垩统之间为不整合接触(图3、图5)。故除了J<sub>3</sub>SQ2层序外,其他层序无剥蚀,其厚度图能够反映古地貌特征。图6显示中侏罗统J<sub>2</sub>SQ1和J<sub>2</sub>SQ2地层厚度呈现出凹陷中心厚、边缘薄的特征;上侏罗统J<sub>3</sub>SQ1和J<sub>3</sub>SQ2层序厚度显示包括A井、B井、C井、D井在内的广大北部地区受岩浆上拱抬升的影响,地层减薄,形成了构造坡折,控制了K<sub>1</sub>SQ1层序的沉积;K<sub>1</sub>SQ1层序的厚度图显示地层北薄南厚的特点,且分布较为局限,这反映其古地貌北高南低,沉积范围明显减小。

同时,火成岩测年结果显示岩浆活动总共有4期:

108~115 Ma、134~145 Ma、207~221 Ma 和 238~244 Ma,其中大多数样品测试的结果为前2期。据王嘹亮等<sup>[41]</sup>最新研究成果,北黄海盆地134~145 Ma期火山活动形成的火山岩年龄处在145±2 Ma和141±2 Ma,对应于晚侏罗世晚期—早白垩世初期。因此根据厚度图及火成岩测年结果,认为研究区北部B井、C井、D井在内的区域上侏罗统地层减薄是受到134~145 Ma期岩浆活动的影响,在晚侏罗世晚期—早白垩世初期岩浆上拱侵入,导致地层抬升形成了控制K<sub>1</sub>SQ1层序沉积的构造坡折带,在下白垩统沉积早期,区域广泛接受沉积形成了北高南低的古地貌特征,该古地貌特征控制了之后K<sub>1</sub>SQ1层序的平面展布(图7、图8)。

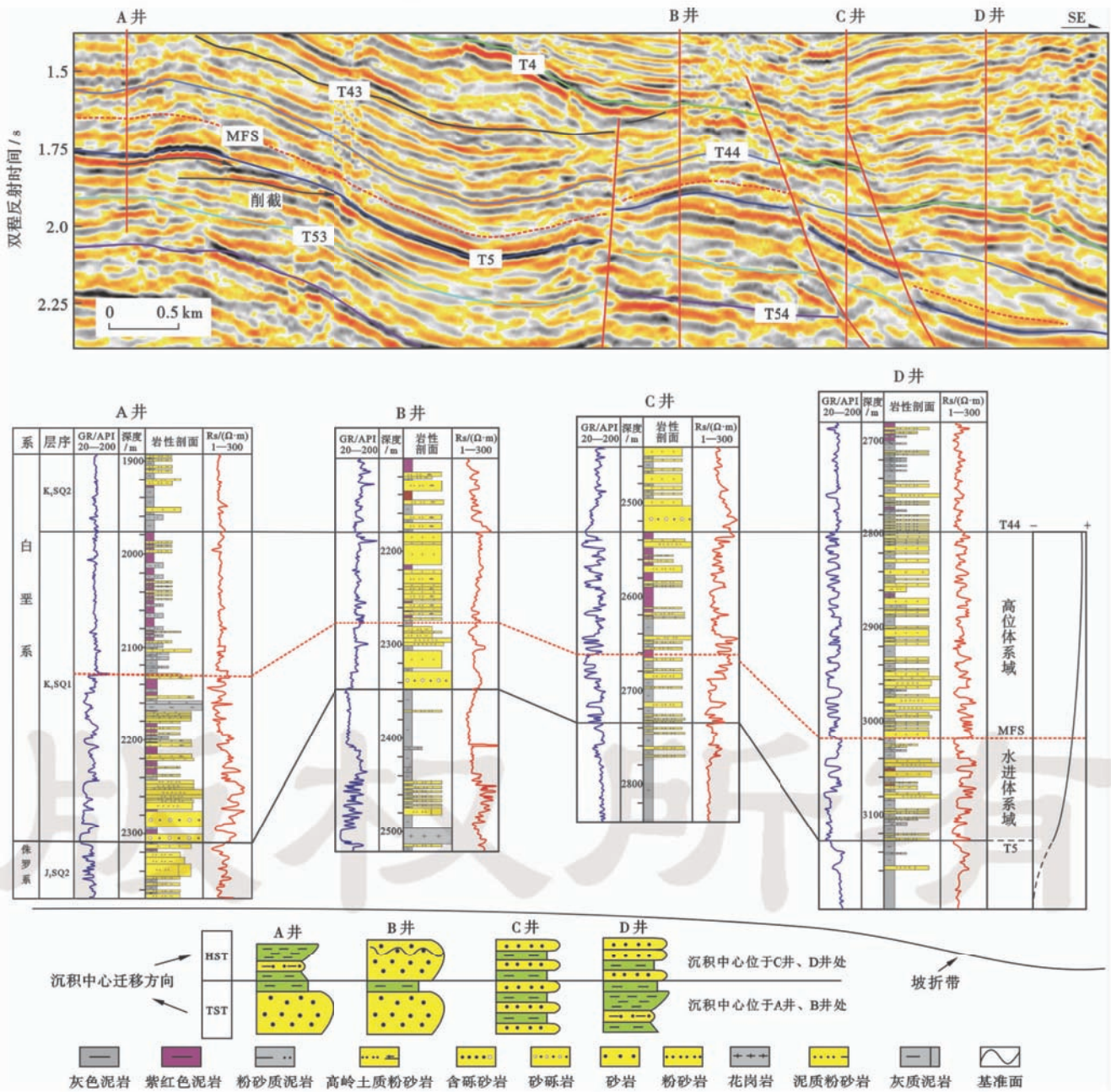


图5 A井—B井—C井—D井连井地震及地质剖面(地震测线 Line2)  
 Fig. 5 Seismic and geological profile of Well A—Well B—Well C—Well D(Seismic Line 2)

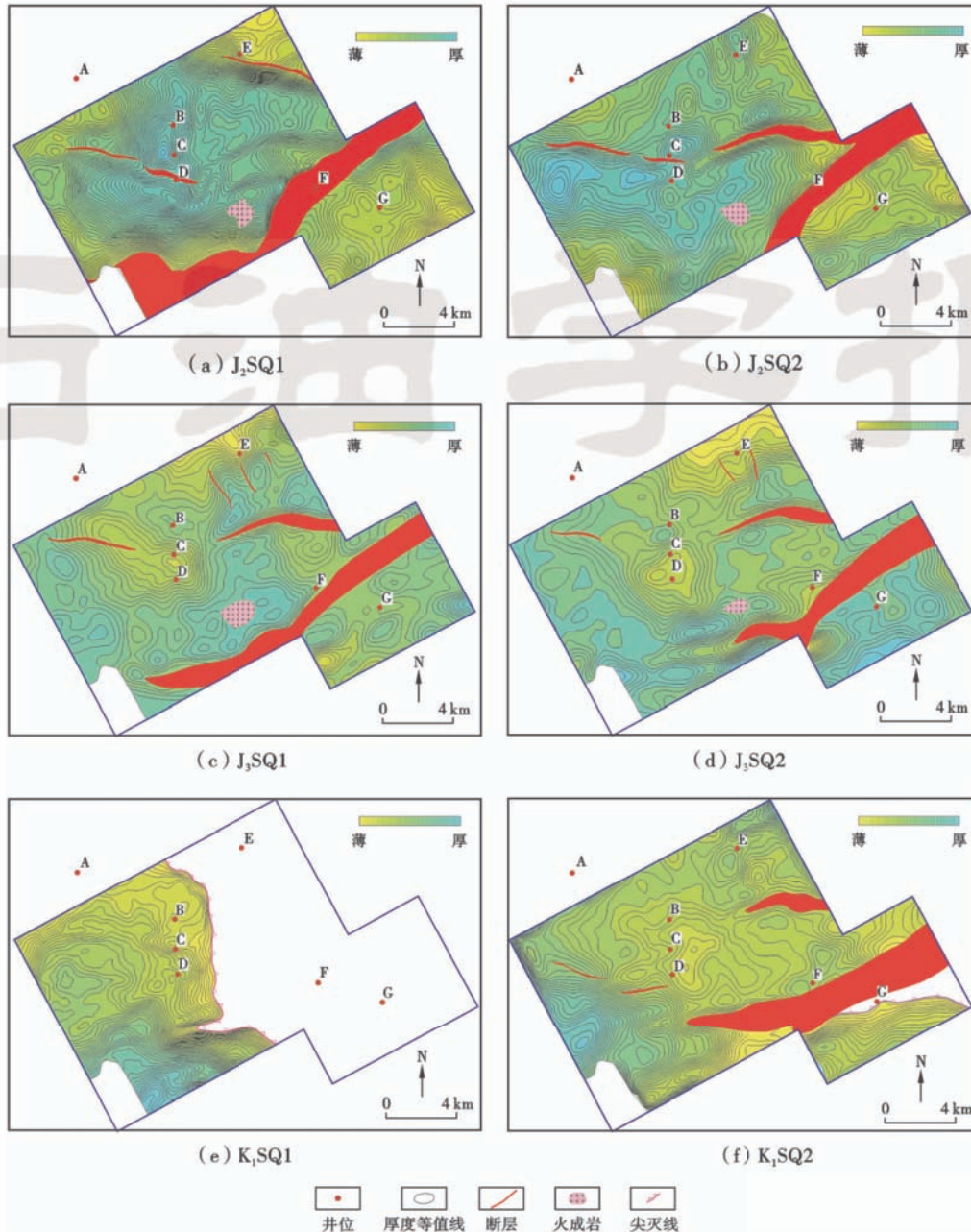


图 6 研究区 J—K 时期层序厚度

Fig. 6 Sequence thickness from Jurassic to Cretaceous in study area

### 3.2 湖平面下降

湖平面的变化及构造沉降是控制盆地可容纳空间变化最重要的 2 个因素<sup>[11,24-27]</sup>,在这些因素的控制之下,沉积中心才能发生迁移,才会沉积有典型的陆相层序。

晚侏罗世晚期—早白垩世初期,由于岩浆上拱导致北部地块抬升,引起了湖平面的快速下降,因此恒定的物源能够长驱直入沉积在坡折带以下地区,形成低位体系域(图 7)。

(1) 在坡折带以上的钻井中可以观察到 K<sub>1</sub>SQ1 层序内部的水进体系域和高位体系域沉积中夹杂有紫

红色泥岩,为暴露沉积的标志;而位于该层序下部的侏罗系泥岩沉积均显示灰色,代表了还原性沉积环境。这意味着,在 K<sub>1</sub>SQ1 层序沉积之前,湖平面曾急剧下降,坡折带以上地区暴露地表,位于高位的泥岩被氧化为紫红色(图 5)。

(2) 通过地震测线 Line2 可以明显观察到 T44 界面超覆在 T5 界面之上[图 8(a)],K<sub>1</sub>SQ1 层序分布范围明显小于其上覆和下伏层序的范围(图 6),这直接表明其可容纳空间急剧减小,意味着湖平面下降,为湖平面下降的直接证据之一。如果以录井泥岩灰色为还原环境和紫红色为氧化环境分别划分为湖平面以下沉

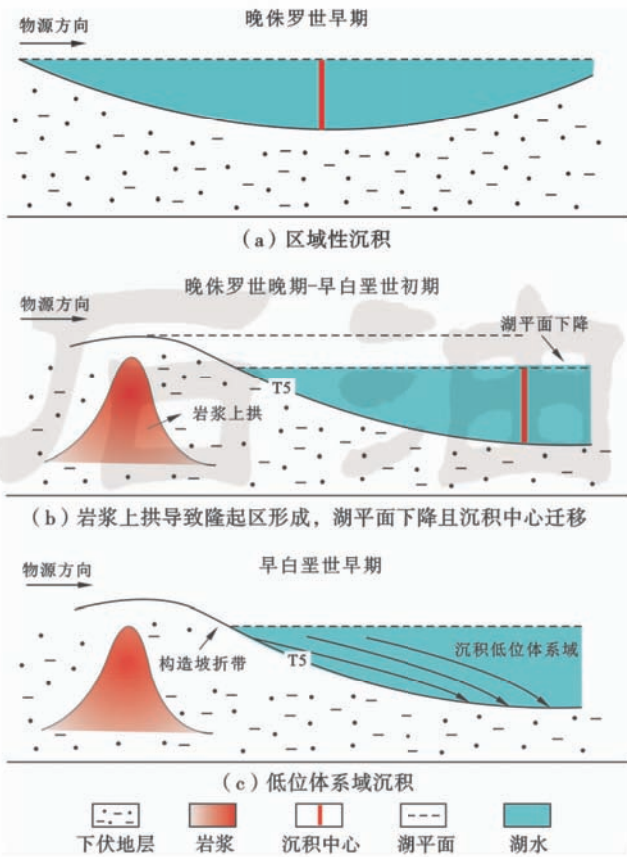


图7 构造坡折带形成过程

Fig. 7 Generation process of structural slope-break belt

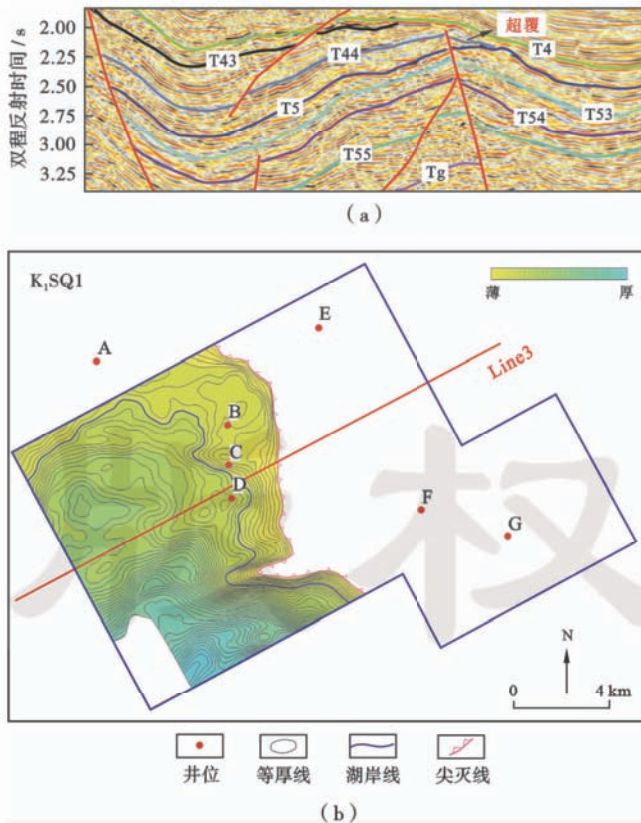


图8 层序顶、底界面地震反射关系(地震测线 Line3)

Fig. 8 Seismic reflection relationship between the top and bottom surfaces of sequence(Seismic Line 3)

积和以上沉积进行湖平面的识别,依据  $K_1SQ1$  层序厚度图可以划出湖平面的分布范围[图 8(b)]。从图 8(b)中可以看出,  $K_1SQ1$  层序湖平面分布范围较为有限,相对于其上、下地层而言,有较为强烈的湖平面下降。

同时,依据地震测线 Line1 在坡折带以下地区识别出了低位扇体和低位进积楔,由此推测,在  $K_1SQ1$  沉积早期,湖平面已经下降至构造坡折带以下,而构造坡折带以上地区处于暴露环境。

(3) 气候变化控制湖平面的升降以及沉积环境的变化,是层序形成演化的重要因素<sup>[24-27,42]</sup>。有些学者认为,中国东部海域在白垩纪时期是干旱气候的陆相沉积环境<sup>[43-45]</sup>,胡小强等<sup>[45]</sup>在对北黄海盆地下白垩统沉积相研究时曾提出,早白垩世沉积岩石中包含石膏等岩矿,同时碳酸钙等碳酸盐的含量很高,表明了早白垩世时期气候干旱,属于咸水湖相沉积环境。另外,在与北黄海盆地相邻且可类比的沉积盆地中,朝鲜安州盆地下白垩统龙盘组地层中发现有早白垩世植物化石 *Brachyllum sp.* 和软体动物 *Compeloma sp.*,孢粉组合以裸子植物花粉为主,蕨类植物孢子次之,出现少许原始被子植物花粉,温带松柏纲花粉在组合中占有绝对优势,热带及亚热带海金沙科和莎草蕨科孢子则在蕨类中占优势<sup>[43,44]</sup>。1989年中朝联合科考中采集的孢粉组合确定在早白垩世巴列姆期至阿普第期,安州盆地当时气候温暖偏干,属亚热带半干旱型<sup>[43-44]</sup>。因此通过前人研究的沉积特征及孢粉组合特征推测北黄海盆地早白垩世时期处于亚热带半干旱—干旱气候,其干旱性的气候环境使得湖水的蒸发量大于补给量,因此湖平面趋于下降。

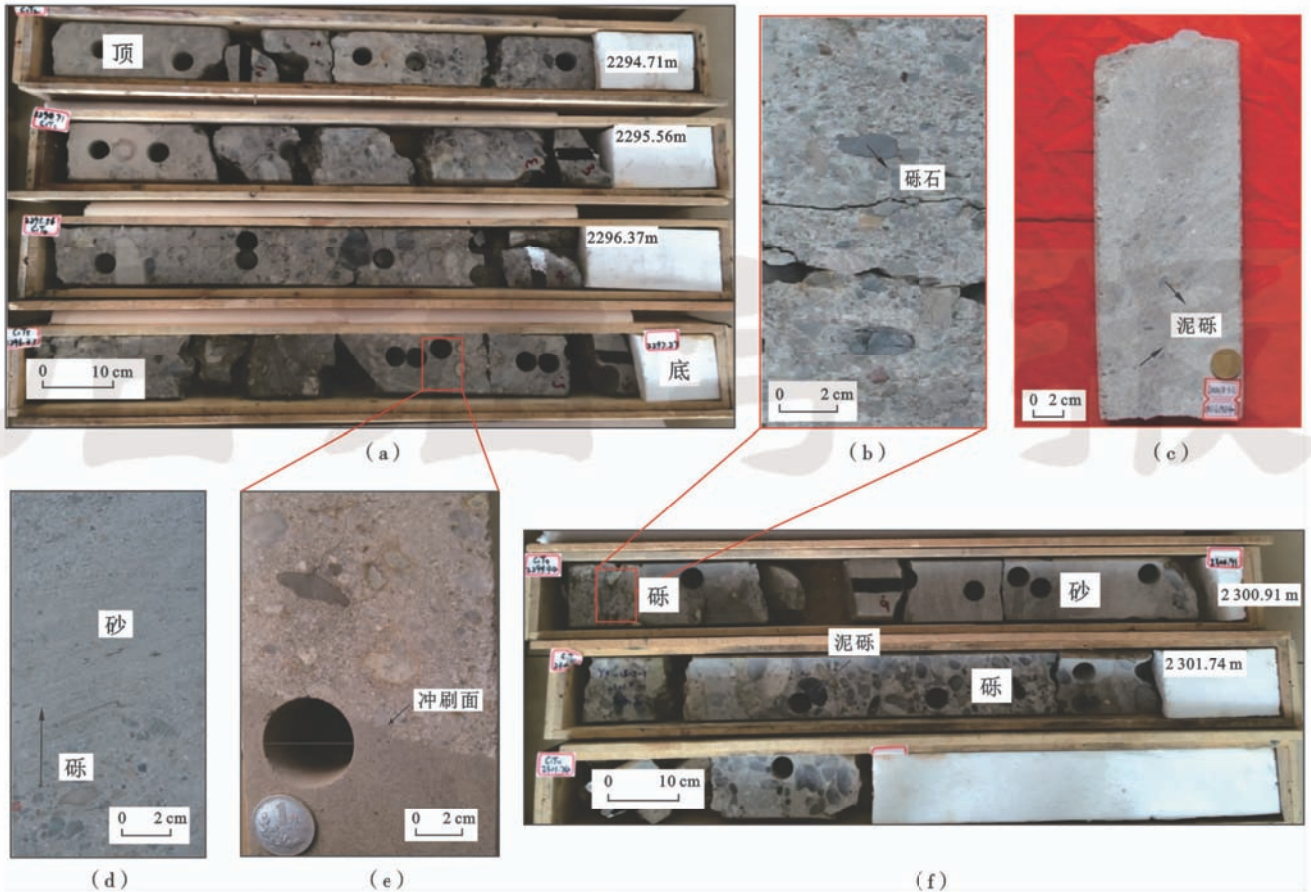
### 3.3 物源供给量相对增大

$K_1SQ1$  层序的厚度(图 6)显示其沉积范围仅仅局限于研究区的西部地区,这就会使得与早期或晚期相比较,供给量相对稳定的物源在  $K_1SQ1$  层序沉积期会相对增大。通过对典型层序发育地区的高精度三维地震资料进行解释,在低位体系域识别出了斜坡扇,斜坡扇的出现显示出相对较大的物源供给(图 3、图 4)。

A 井、B 井、D 井的  $K_1SQ1$  层序岩性组合为厚层砂岩与薄层泥岩不等厚互层,砂岩以粗砂岩或砂砾岩为主(图 9),无论从砂岩含量(60%~70%以上)还是砂岩粒度上都明显高于上、下地层,代表了较强的水动力环境和相对大的物源供给(图 5)。

同时,图 9(a)—图 9(f)的岩心照片显示,在下白垩统地层发育段,岩心描述多反映出重力流沉积的特





(a)重力流沉积,B井 2293.69~2297.27 m;(b)混杂堆积,B井 2300 m;(c)含泥砾砂岩,D井 2961.16~2961.41 m;(d)递变层理,D井 3080.1 m;(e)冲刷面,B井 2297 m;(f)周期性快速堆积,B井 2299.94~2302.14 m。

图 9 下白垩统重力流沉积特征岩心照片

Fig. 9 Lower Cretaceous core photos reflecting the sedimentary characteristics of gravity flow

征,其中 B 井、D 井以混杂堆积为主,砾石分选较差、颗粒支撑且具有泥质填隙的特征。同时岩心中可见泥砾,泥砾大小为 5~50 mm,岩心自下而上总体呈现出周期性快速堆积的特点[图 9(c)—图 9(f)],且多表现为块状层理,局部发育递变层理,可见冲刷面构造[图 9(d)、图 9(e)]。

以上证据表明在  $K_1$  SQ1 层序沉积时期有较大且稳定的物源供给,且以水下重力流沉积为主。

#### 4 层序发育模式

依据以上层序的构成特征以及控制因素分析,能够概括和建立研究区的层序发育模式。

在  $K_1$  SQ1 层序内部能够识别出低位体系域、水进体系域和高位体系域。低位体系域包括具有双向下超特征的低位扇体、顶超至初始水进面且下超至层序底界面之上的低位进积楔体、砂体填充的凹槽形下切谷水道;高位体系域具有典型的前积型准层序组,下超于最大洪泛面之上;水进体系域尽管较薄,但仍然能够依

照初次水进面和最大洪泛面进行识别。在层序各体系域分布方面,低位体系域位于构造坡折带以下的地区,发育占优势地位;水进体系域及高位体系域则位于构造坡折带以上的地区,其中水进体系域发育占劣势地位;初次水进面与最大洪泛面在坡折带以下近盆地中心的位置近乎重合,导致水进体系域与高位体系域主体分布在靠近盆地边缘的位置,向盆地中心方向逐渐减薄(图 10)。

综上所述,层序形成的整个过程可以概括为:在晚侏罗世晚期—早白垩世初期,由于受岩浆上拱活动的影响,研究区的北部大部分地区被抬升形成了构造坡折。由于受到构造抬升影响,湖平面急剧下降,致使在  $K_1$  SQ1 层序沉积时期,可容纳空间减小,从而使得沉积物供给量相对增大,且快速堆积在坡折带以下地区,形成了低位体系域;随着构造沉降速率的增大,湖平面快速上升,沉积了较薄的水进体系域;随后构造沉降速率减缓,湖平面上升速率减缓,大物源向沉积中心进积,形成了高位体系域。

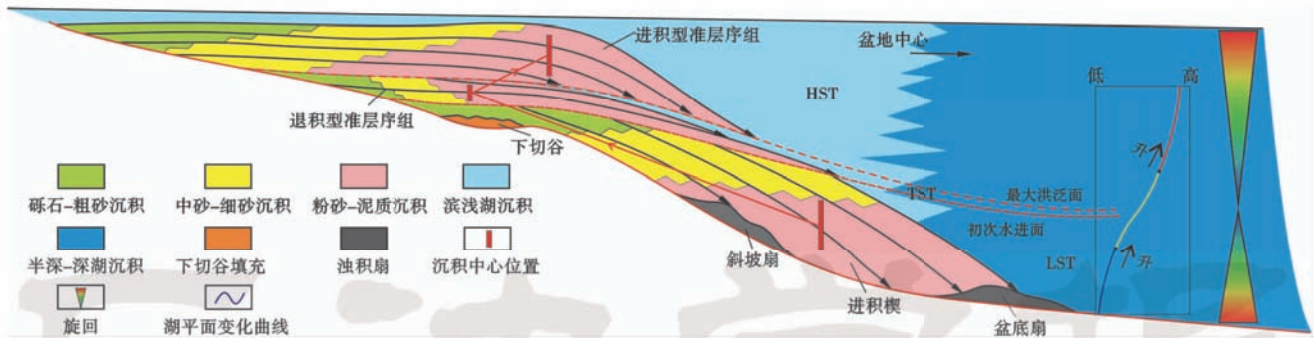


图10 岩浆活动背景下陆相层序发育模式

Fig. 10 Development pattern of terrestrial sequence under the setting of magmatic activity

## 5 结论

(1) 通过三维高分辨率地震反射资料及精细钻井资料,识别出了研究区  $K_1$  SQ1 层序内部发育有低位体系域、水进体系域、高位体系域以及初次水进面与最大洪泛面,低位体系域包括斜坡扇、下切谷、低位进积楔,其中低位进积楔具有顶超于初次水进面和下超于层序底界面的典型特征;高位体系域具有明显的前积反射特征。

(2) 北黄海盆地  $K_1$  SQ1 层序发育主要受构造坡折带的形成、湖平面的下降和物源供给量相对增大的综合影响。

(3) 基于层序的构成特征及主要控制因素分析,提出了陆相盆地岩浆活动背景下层序的发育模式,认为岩浆上拱侵入引起了地层隆起,导致了构造坡折带的形成,对层序的形成起到了决定性的作用,控制了之后层序的沉积。

### 参考文献

- [1] 李思田,杨士恭,林畅松. 论沉积盆地的等时地层格架和基本建造单元[J]. 沉积学报,1992,10(4):11-22.  
Li Sitian, Yang Shigong, Lin Changsong. On the chronostratigraphic framework and basic building blocks of sedimentary basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(4): 11-22.
- [2] Posamentier H W, Weimer P. Siliciclastic sequence stratigraphy and petroleum geology—where to from here[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(5): 731-742.
- [3] 胡受权,郭文平. 论陆相层序地层学理论体系及其研究思路[J]. 断块油气田, 2001, 8(5): 1-7.  
Hu Shouquan, Guo Wenping. Theoretical system and technical system on terrestrial sequence stratigraphy[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2001, 8(5): 1-7.
- [4] 解习农,李思田. 陆相盆地层序地层研究特点[J]. 地质科技情报, 1993, 12(1): 22-26.  
Xie Xinong, Li Sitian. Characteristics of sequence stratigraphic analysis in terrestrial basin[J]. Geological Science and Technology Information, 1993, 12(1): 22-26.
- [5] 余素玉,邬金华. 层序地层学方法及其在陆相湖盆研究中的应用[J]. 地质科技情报, 1993, 12(2): 37-43.  
Yu Suyu, Wu Jinhua. Sequence Stratigraphy and its application to study of inland lake sedimentary basins[J]. Geological Science and Technology Information, 1993, 12(2): 37-43.
- [6] 魏魁生,徐怀大. 华北典型箕状断陷盆地层序地层学模式及其与油气赋存关系[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1993, 18(2): 139-149.  
Wei Kuisheng, Xu Huaida. Sequence stratigraphic models and their relationship to oil and gas occurrence in typical faulted basins, Northern China[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1993, 18(2): 139-149.
- [7] 魏魁生,徐怀大. 二连盆地白垩系非海相沉积层序地层特征[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1994, 19(2): 181-193.  
Wei Kuisheng, Xu Huaida. Sequence stratigraphic features of Cretaceous nonmarine sediments in Erlian Basin[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1994, 19(2): 181-193.
- [8] 魏魁生,叶淑芬,郭占谦,等. 松辽盆地白垩系非海相沉积层序模式[J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 50-60.  
Wei Kuisheng, Ye Shufen, Guo Zhanqian, et al. Sequence stratigraphic model of nonmarine sediments in Cretaceous, Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(4): 50-60.
- [9] 胡受权,颜其彬. 泌阳断陷双河—赵凹地区陆相层序地层学模式[J]. 地质科学, 1998, 33(4): 435-446.  
Hu Shouquan, Yan Qibin. Sequence stratigraphic model in Shuanghe—Zhao'ao of Biyang fault-depression, Henan Province[J]. Scientia Geologica Sinica, 1998, 33(4): 435-446.
- [10] 陈飞,罗平,张兴阳,等. 鄂尔多斯盆地东缘上三叠统延长组砂体结构与层序地层学研究[J]. 地学前缘, 2010, 17(1): 330-338.  
Chen Fei, Luo Ping, Zhang Xingyang, et al. Stratigraphic architecture and sequence stratigraphy of Upper Triassic Yanchang Formation in the eastern margin of Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 330-338.
- [11] Vail P R. Sequence stratigraphy workbook, fundamentals of sequence stratigraphy [C] // AAPG Annual Convention Short Course, Houston, Texas, 1988.

- [12] Vail P R, Mitchum R M Jr, Thompsons S. Global-cycle of relative change of sea level[J]. AAPG Memoir, 1977, 26: 88-97.
- [13] Shanley K W, McCabe P J. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(4): 544-568.
- [14] 李思田, 林畅松, 解习农, 等. 大型陆相盆地层序地层学研究——以鄂尔多斯中生代盆地为例[J]. 地学前缘(中国地质大学, 北京), 1995, 2(3/4): 133-136.  
Li Sitian, Lin Changsong, Xie Xinong, et al. Approaches of non-marine sequence stratigraphy: a case study on the Mesozoic Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers(China University of Geoscience, Beijing), 1995, 2(3/4): 133-136.
- [15] 吴因业, 张文舒, 张志杰, 等. 沉积体系域类型、特征及石油地质意义[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 69-81.  
Wu Yinye, Zhang Tianshu, Zhang Zhijie, et al. Types and characteristics of depositional systems tract and its petroleum geological significance[J]. Journal of Palaeogeography, 2010, 12(1): 69-81.
- [16] Hunt D, Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base level fall[J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(1/2): 1-9.
- [17] 胡受权, 郭文平, 颜其彬, 等. 断陷湖盆陆相层序中体系域四分性探讨——泌阳断陷下第三系核桃园组为例[J]. 石油学报, 2000, 21(1): 23-28.  
Hu Shouquan, Guo Wenping, Yan Qibin, et al. Discussion on system tract four-division for a terrigenous sequence stratigraphy in fault-depressed lacustrine basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(1): 23-28.
- [18] Van Wagoner J C, Posamentier H W, Mitchum R M, et al. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions[J]. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1988, 42: 39-45.
- [19] Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M. Siliciclastic sequences stratigraphy in well logs, cores and outcrops; concepts for high-resolution correlation of time and facies [J]. AAPG Methods in Exploration Series, 1990, 7: 1-240.
- [20] 谢渊, 刘家锋, 王剑, 等. 陆相层序地层学研究进展与挑战[J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(2): 8-17.  
Xie Yuan, Liu Jiaduo, Wang Jian, et al. Current advances and future aspects of continental sequence stratigraphy[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2002, 22(2): 8-17.
- [21] 顾家裕. 陆相盆地层序地层学格架概念及模式[J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 6-10.  
Gu Jiayu. Framework concepts and models of sequence stratigraphy in nonmarine petroliferous basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(4): 6-10.
- [22] 顾家裕, 郭彬程, 张兴阳. 中国陆相盆地层序地层格架及模式[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(5): 11-14.  
Gu Jiayu, Guo Bincheng, Zhang Xingyang. Sequence stratigraphic framework and model of the continental basins in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(5): 11-14.
- [23] 顾家裕, 张兴阳. 陆相层序地层学进展与在油气勘探开发中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(5): 484-490.  
Gu Jiayu, Zhang Xingyang. Progress in continental sequence stratigraphy and its application in petroleum exploration and development[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(5): 484-490.
- [24] 纪友亮, 杜金虎, 赵贤正, 等. 饶阳凹陷古近系层序发育的控制因素分析[J]. 沉积学报, 2007, 25(2): 161-168.  
Ji Youliang, Du Jinhu, Zhao Xianzheng, et al. Sequence stratigraphy models and controlling factors of Eogene in Raoyang depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(2): 161-168.
- [25] 纪友亮, 王勇, 李清山, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组层序发育模式及控制因素研究[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(4): 9-15.  
Ji Youliang, Wang Yong, Li Qingshan, et al. Study on sequence models and controlling factors of Paleogene Dainan Formation in Gaoyou sag, northern Jiangsu Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(4): 9-15.
- [26] 于兴河, 姜辉, 李胜利, 等. 中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素——以济阳拗陷东营凹陷为例[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(1): 39-45.  
Yu Xinghe, Jiang Hui, Li Shengli, et al. Depositional filling models and controlling factors on Mesozoic and Cenozoic fault basins of terrestrial facies in eastern China: a case study of Dongying sag of Jiyang depression[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(1): 39-45.
- [27] 郑敬贵, 李仲东, 傅恒, 等. 廊固凹陷古近系陆相断陷湖盆层序地层发育主控因素研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2006, 33(3): 240-245.  
Zheng Jinggui, Li Zhongdong, Fu Heng, et al. Study on key influential factors of sequence stratigraphy development in fault lacustrine basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2006, 33(3): 240-245.
- [28] 杨永华, 纪友亮, 曹瑞成, 等. 蒙古塔木察格盆地塔南凹陷下白垩统层序结构类型、控制因素与层序发育模式[J]. 现代地质, 2009, 23(4): 655-666.  
Yang Yonghua, Ji Youliang, Cao Ruicheng, et al. Types of sequences, controlling factors and sequence models for Lower Cretaceous of Tanan depression in Tamtsag Basin, Mongolia[J]. Geoscience, 2009, 23(4): 655-666.
- [29] 王华, 廖远涛, 陆永潮, 等. 中国东部新生代陆相断陷盆地层序的构成样式[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(1): 277-285.  
Wang Hua, Liao Yuantao, Lu Yongchao, et al. Sequence architecture styles of Cenozoic continental rift basins in East China[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(1): 277-285.
- [30] 蔡乾忠. 黄海含油气盆地地质与大地构造环境[J]. 海洋地质动态, 2002, 18(11): 8-12.  
Cai Qianzhong. Regional geology and geotectonic environment of petroliferous basins in the Yellow Sea [J]. Marine Geology Letters, 2002, 18(11): 8-12.
- [31] 林年添, 高登辉, 孙剑, 等. 南黄海盆地青岛坳陷二叠系、三叠系地震属性及其地质意义[J]. 石油学报, 2012, 33(6): 987-995.  
Lin Niantian, Gao Denghui, Sun Jian, et al. Seismic attributes of the Permian and Triassic in Qingdao depression, South Yellow Sea Basin and their geological significance[J]. Acta Petrolei Sini-

- ca, 2012, 33(6): 987-995.
- [32] 刘振湖, 高红芳, 胡小强, 等. 北黄海盆地东部坳陷中生界含油气系统研究[J]. 中国海上油气, 2007, 19(4): 229-233.  
Liu Zhenhu, Gao Hongfang, Hu Xiaoqiang, et al. A study on the Mesozoic petroleum system in East depression, North Yellow Sea Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(4): 229-233.
- [33] Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, et al. The ICS International Chronostratigraphic chart[J]. Episodes, 2013, 36(3): 199-204.
- [34] 龚承林, 雷怀彦, 王英民, 等. 北黄海盆地东部坳陷构造演化与油气地质特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 79-86.  
Gong Chenglin, Lei Huaiyan, Wang Yingmin, et al. Hydrocarbon geologic characters and structural evolution in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(1): 79-86.
- [35] 张阳, 邱隆伟, 杨勇强, 等. 频繁超剥地区层序、不整合特征及圈闭发育模式——以东营凹陷草桥北部地区沙河街组四段上亚段—东营组为例[J]. 石油学报, 2014, 35(5): 857-866.  
Zhang Yang, Qiu Longwei, Yang Yongqiang, et al. Sequence and unconformity characteristics and trap development model in frequent onlap-denudation area: a case study of the Ed-Es<sub>4s</sub> in northern Caoqiao area, Dongying sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(5): 857-866.
- [36] 杨波, 张昌民, 李少华, 等. 珠江口盆地大型丘状地质体地震相分析及地质解释[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 37-49.  
Yang Bo, Zhang Changmin, Li Shaohua, et al. Seismic facies analysis and geological interpretation of large-scale mounds in Pearl River Mouth Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 37-49.
- [37] Galloway W E. Genetic stratigraphic sequence in basin analysis I: architecture and genesis of flooding surface bounded depositional units[J]. AAPG Bulletin, 1990, 73(2): 125-142.
- [38] 解习农, 葛立刚. 琼东南盆地断陷期层序地层模式[J]. 地质科学, 1997, 32(1): 47-55.  
Xie Xinong, Ge Ligang. Sequence stratigraphic model in near-shore fault basin—case study on the rifting stage of Qiongdongnan Basin[J]. Scientia Geologica Sinica, 1997, 32(1): 47-55.
- [39] 牛嘉玉, 冯有良, 鲁卫华, 等. 中国东部陆相湖盆层序类型与岩性圈闭发育特征[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 18-22.  
Niu Jiayu, Feng Youliang, Lu Weihua, et al. Sequence type and lithologic trap distribution in lacustrine basin of East China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 18-22.
- [40] 侯宇光, 何生, 王冰洁, 等. 板桥凹陷构造坡折带对层序和沉积体系的控制[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 754-761.  
Hou Yuguang, He Sheng, Wang Bingjie, et al. Constraints by tectonic slope-break zones on sequences and depositional systems in the Banqiao sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(5): 754-761.
- [41] 王嘹亮, 许中杰, 程日辉, 等. 北黄海盆地上侏罗统-下白垩统火山岩形成时代: 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年证据[J]. 大地构造与成矿学, 2015, 39(1): 179-186.  
Wang Liaoliang, Xu Zhongjie, Cheng Rihui, et al. Zircon U-Pb geochronology of Early Jurassic-Late Cretaceous volcanic rocks in North Yellow Sea Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2015, 39(1): 179-186.
- [42] 张冬玲, 鲍志东, 杨文秀. 准噶尔盆地侏罗系层序地层格架的建立及主控因素分析[J]. 大庆石油学院学报, 2005, 29(2): 10-12.  
Zhang Dongling, Bao Zhidong, Yang Wenxiu. Foundation of Sequence stratigraphy framework and the analysis of the dominating factors of Jurassic in Junggar Basin[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2005, 29(2): 10-12.
- [43] 江德昕, 杨惠秋. 朝鲜安州盆地早白垩世孢粉组合[J]. 植物学报, 1996, 38(2): 150-155.  
Jiang Dexin, Yang Huiqiu. Early Cretaceous Palynoflora from Anchow Basin, Korea[J]. Acta Botanica Sinica, 1996, 38(2): 150-155.
- [44] 吴琳, 许红, 何将启, 等. 北黄海盆地与朝鲜安州盆地和中国胶莱盆地的对比[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(8): 22-26.  
Wu Lin, Xu Hong, He Jiangqi, et al. Comparison of the North Yellow Sea Basin with Anju Basin of Korea and Jialai Basin of China[J]. Marine Geology Letters, 2004, 20(8): 22-26.
- [45] 胡小强, 刘振湖, 陈玲, 等. 北黄海盆地某研究区块钻井层序地层及沉积特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(2): 103-110.  
Hu Xiaoqiang, Liu Zhenhu, Chen Ling, et al. Cycle sequence stratigraphy and sedimentary characteristics of study area X in the North Yellow Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(2): 103-110.

(收稿日期 2015-06-03 改回日期 2015-08-30 责任编辑 张怡)

版权所有