

文章编号:0253-9985(2011)06-0839-12

## 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组层序地层

高红灿<sup>1,2</sup>, 郑荣才<sup>3</sup>, 陈发亮<sup>2</sup>, 韩福民<sup>2</sup>, 刘云<sup>2</sup>

(1. 中国石化 中原油田 博士后科研工作站, 河南 濮阳 457001; 2. 中国石化 中原油田分公司 物探研究院, 河南 濮阳 457001; 3. 成都理工大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:**通过对研究区300多口钻井的地层对比和3000多米岩心的详细观察及区域构造-沉积演化分析,综合运用构造、古生物、岩性、地质年代以及测井和地震反射等6个方面的特征,将东濮凹陷古近系划分为3个超长期层序,分别对应于沙河街组四段下亚段、沙河街组四段上亚段—沙河街组三段、沙河街组二段—东营组;并将沙河街组四段上亚段—沙河街组一段划分为4个长期层序,分别对应于沙河街组四段上亚段—沙河街组三段四亚段、沙河街组三段三亚段、沙河街组三段二亚段—沙河街组三段一亚段、沙河街组二段—沙河街组一段。提出同一套连续沉积的盐岩在长期及超长期层序划分中具不可分割性,并结合东濮凹陷及渤海湾盆地层序划分的实例,指出目前普遍存在的层序地层划分方案与岩石地层划分方案相一致的现象值得商榷。

**关键词:**层序地层;沙河街组;古近系;东濮凹陷;渤海湾盆地

**中图分类号:**TE121.3

**文献标识码:**A

## Sequence stratigraphy of the Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

Gao Hongcan<sup>1,2</sup>, Zheng Rongcai<sup>3</sup>, Chen Faliang<sup>2</sup>, Han Fumin<sup>2</sup>, Liu Yun<sup>2</sup>

(1. Postdoctoral Scientific Research Station, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China;  
2. Geophysical Research Institute, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China;  
3. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

**Abstract:** Based on stratigraphical correlation of over 300 wells, detailed core description of more than 3 000 m, and analysis of regional tectonic-sedimentary evolution, we divided the Paleogene in Dongpu Sag into three super long-term sequences according to various data such as tectonic geology, paleontology, lithology, geochronology, logging and seismic reflection, etc. The three sequences corresponds to the lower 4<sup>th</sup> member of Shahejie Formation, the upper 4<sup>th</sup> member to the 3<sup>rd</sup> member of the Shahejie Formation, the 2<sup>nd</sup> member of Shahejie Formation to the Dongying Formation respectively. Furthermore, strata from the upper 4<sup>th</sup> member to the 1<sup>st</sup> member of Shahejie Formation is divided into four long-term sequences, corresponding to the upper 4<sup>th</sup> member to the 4<sup>th</sup> sub-member of the 3<sup>rd</sup> member, the 3<sup>rd</sup> sub-member of the 3<sup>rd</sup> member, the 1<sup>st</sup> to the 2<sup>nd</sup> sub-member of the 3<sup>rd</sup> member and the 1<sup>st</sup> to the 2<sup>nd</sup> member of Shahejie Formation respectively. This paper indicates that a set of continuous salt deposits is undividable when dividing the super long-term and long-term sequence. Taking the Dongpu Sag and Bohai Bay Basin as examples, we pointed that the common practice of making sequence stratigraphic classification scheme consistent with lithostratigraphic classification scheme is possibly incorrect.

**Key words:** sequence stratigraphy, Shahejie Formation, Paleogene, Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

收稿日期:2010-09-29;修订日期:2011-11-04。

第一作者简介:高红灿(1969—),男,博士,沉积学。

基金项目:油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金项目(PLC201007);中国博士后科学基金项目(20080440125,201003403)。

1 地质背景

东濮凹陷位于渤海湾裂谷盆地西南缘,属临清坳陷的一部分。其东侧以兰聊断裂与鲁西隆起为界,西侧超覆于内黄隆起上,南隔兰考凸起与开封坳陷相望,北以马陵断层与莘县凹陷相连(图 1)。是一个呈北北东向延伸、南宽(62 km)北窄(16 km)、具多沉积韵律的新生代含盐盆地,总面积约 5 300 km<sup>2</sup>。在构造演化及沉积相带上具有明显的“东西分带、南北分块”的特征,主要受北北东向的兰聊断层带、黄河-文西-观城断层带和长垣-石家集-宋庙断层带 3 条大断层带的控制,形成了“两洼一隆一陡一斜坡”的构造格局(图 1),以及以海通集-桥口-白庙一线为界,北部盐岩沉积发育而南部不发育的沉积格局。

东濮凹陷古近系沙河街组沉积层序的研究起始于 20 世纪 80 年代初期地震地层学研究;20 世纪 90 年代后期人们开始对东濮凹陷进行层序地层学研究。郭建华等<sup>[1]</sup>对前梨园地区沙河街组三段三亚段(简称沙三三亚段,下同)和沙三三亚段上部(注:当时认为的沙三三亚段的上部相当于目前地层划分中的沙三三亚段)进行了 T-R (Transgressive-Regressive) 旋回研究,将沙三三亚段和沙三三亚段分别划分成 4 个和 3 个相当于 V 级层序的 T-R 旋回;2000 年之后,东濮凹陷层序地层研究取得了较大进展,但层序划分方案基本相似,将古近系划分为 2 个 II 级层序<sup>[2-4]</sup>或 3 个<sup>[5-9]</sup> II 级层序,将沙河街组划分为 8~9 个 III 级层序,特别是沙四上亚段-沙二段的层序划分较一致,均为 6 个 III 级层序<sup>[2-10]</sup>。

通过对东濮凹陷,特别是北部地区 300 多口钻井深入的地层对比和 3 000 多米岩心的详细观

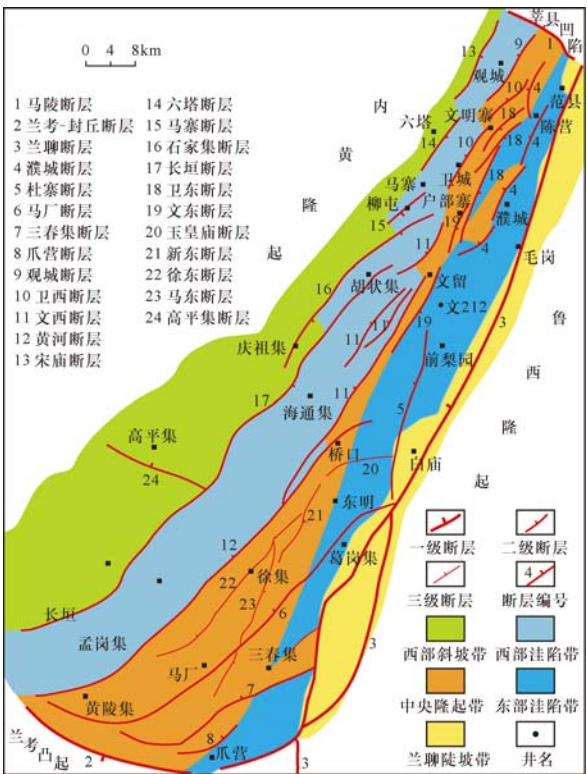


图 1 渤海湾盆地东濮凹陷构造分区

Fig. 1 Tectonic divisions of Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

察,认为前人对东濮凹陷古近系沙河街组的层序地层划分有些值得商榷的问题,如沙河街组二段上亚段的底还是沙河街组二段下亚段的底是 II 级层序界面;沙河街组能否划分出 8-9 个 III 级层序;沙河街组四段下亚段(即“低阻红层”)是否只是一个 III 级层序,即沙河街组四段上、下亚段之间的界面是 III 级层序界面还是 II 级层序界面,等等。综合运用构造、古生物、岩性、地质年代以及测井和地震反射等 6 个方面的特征,结合区域构造-沉积演化分析,以郑荣才教授等的层序级次划分和命名原则<sup>[11]</sup>为基础(表 1),同时考虑界面性质、界面级次、层序结构和叠加样式等,对东濮凹陷古

表 1 层序划分方案和基本特征(据郑荣才等<sup>[11]</sup>,有修改)

Table 1 Classification and basic characteristics of sequences stratigraphy(modified from Zheng Rongcai et al.<sup>[11]</sup>)

| 层序名称 | 时限范围/Ma | 层序定义                                     | 层序发育规模  | 主要控制因素       | 与 Vail 相当的层序地层单元对比 | 在渤海湾盆地内的可对比范围 |                          |
|------|---------|------------------------------------------|---------|--------------|--------------------|---------------|--------------------------|
| 超长期  | 10 ~ 50 | 以盆地演化各阶段为单位的构造充填序列(或构造充填层序、构架层序)         | 数百米—千余米 | 构造演化阶段的应力场转换 | 不能完全对比             | 相当Ⅲ级层序组       | 渤海湾盆地范围内均可对比             |
| 长期   | 1 ~ 5   | 一套具较大水深变化幅度的、彼此间具成因联系的地层所组成的区域性湖进-湖退沉积序列 | 百余米—数百米 | 构造幕的脉动性强弱变化  | 不能完全对比             | 相当Ⅲ级层序        | 渤海湾盆地内各凹陷或同一凹陷相邻沉积体系中可对比 |

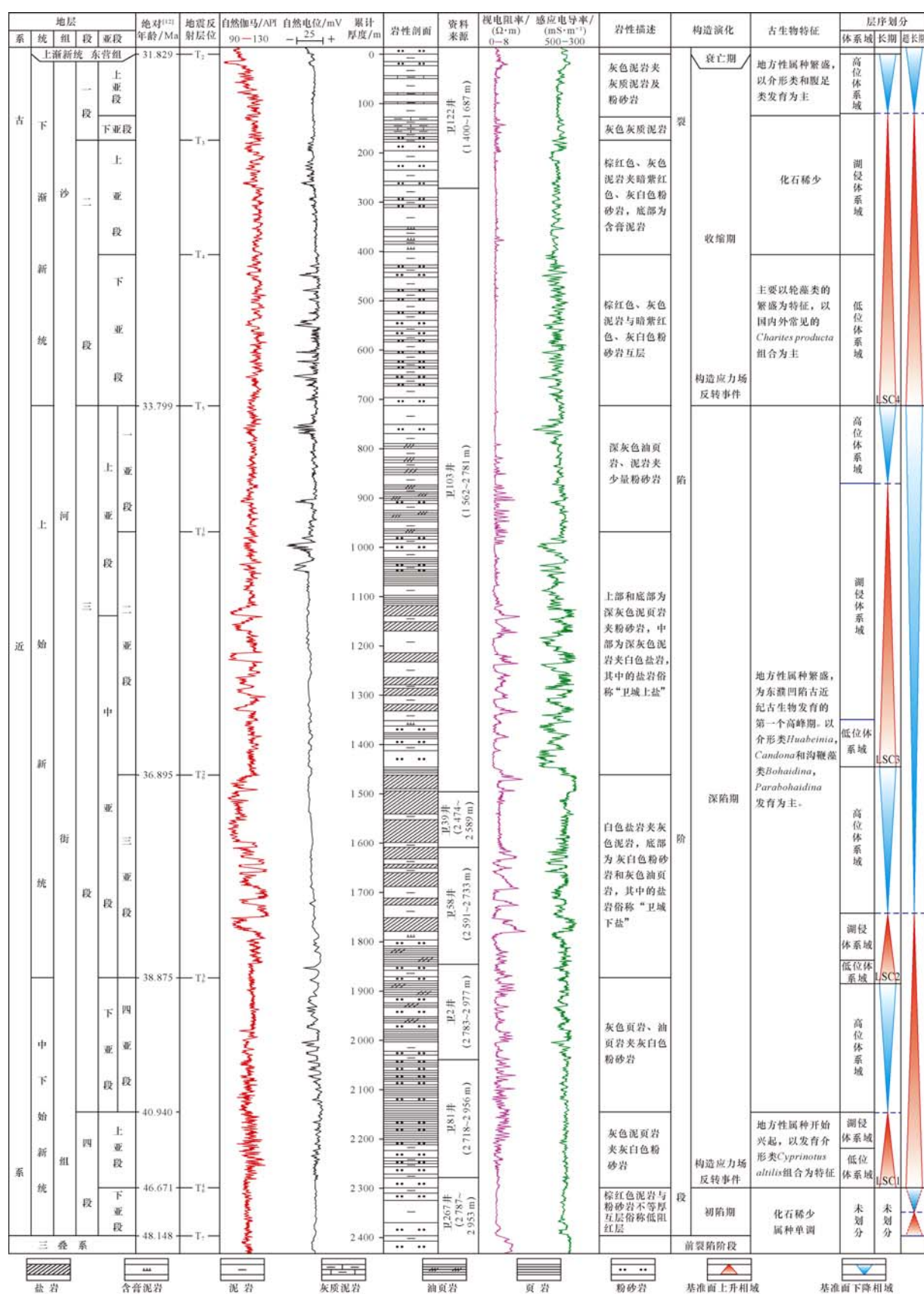


图2 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组层序地层综合柱状图

Fig. 2 Synthetic histogram of sequence stratigraphy of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

近系沙河街组进行了超长期和长期的高分辨率层序地层分析。将东濮凹陷古近系划分为3个超长期层序,分别对应于沙河街组四段下亚段(即“低阻红层”)、沙河街组四段上亚段—三段、沙河街组二段—东营组,并将其中的沙河街组四段上亚段—一段划分为4个长期层序,分别对应于沙四上亚段—沙三三亚段、沙三三亚段、沙三二亚段—沙三一亚段、沙二段—一段,自下而上命名为LSC1、LSC2、LSC3、LSC4(图2)。

## 2 超长期层序

### 2.1 构造特征

新生代渤海湾盆地的形成演化主要经历了3个构造应力场反转事件:①发生在始新世初期,造成沙河街组四段下亚段(在东濮凹陷称为“低阻红层”)和沙河街组四段上亚段之间不整合接触的构造应力场反转事件。主要是库拉板块的消亡和太平洋板块对欧亚板块的俯冲由北北西向北西西方向的转变(40~44 Ma)影响了中国东部的区域构造应力场<sup>[13-14]</sup>,使其由始新世之前的左旋剪切变为之后的右旋<sup>[15]</sup>,其后,正是渤海湾盆地新生代裂陷活动最强烈的时期。这一构造应力场反转事件与印度板块开始向欧亚板块碰撞的时间(45 Ma)基本一致<sup>[16-17]</sup>,称为早喜马拉雅运动(40~50 Ma)<sup>[18]</sup>。②发生在始新世末期,造成始新统与渐新统之间的平行不整合和局部不整合的构造应力场反转事件。这次事件在渤海湾盆地范围内普遍存在,与印度板块和欧亚板块碰撞角度由40°NE转为15°NE相关<sup>[19]</sup>,在东濮凹陷内表现为沙河街组三段与沙河街组二段之间的平行不整合。③发生在古近纪末期—新近纪初期,造成古近系与新近系之间不整合的构造应力场反转事件。这次构造应力场反转事件造成渤海湾盆地的区域构造应力场由古近纪的右旋张扭转化为新近纪的右旋压扭,致使渤海湾盆地由裂陷变为坳陷。这次构造应力场反转事件在渤海湾盆地内普遍存在,称为东营运动,时间上与中喜马拉雅运动一致<sup>[18]</sup>。

相应于渤海湾盆地3个构造应力场反转期,东濮凹陷的构造演化也表现为明显的阶段性(图2),

即初陷期、深陷期、收缩—衰亡期,构成了东濮凹陷古近纪3个期次的幕式张裂活动<sup>[20]</sup>。

1) 初陷期为沙河街组四段下亚段沉积期,是东濮凹陷的初始裂陷期,断层活动性差。发育以兰聊断层为代表的低角度西倾正断层为特征,其总断层水平断距平均生长速率为230 m/Ma(图3),兰聊断层的垂向断距平均生长速率为160 m/Ma(图4)。

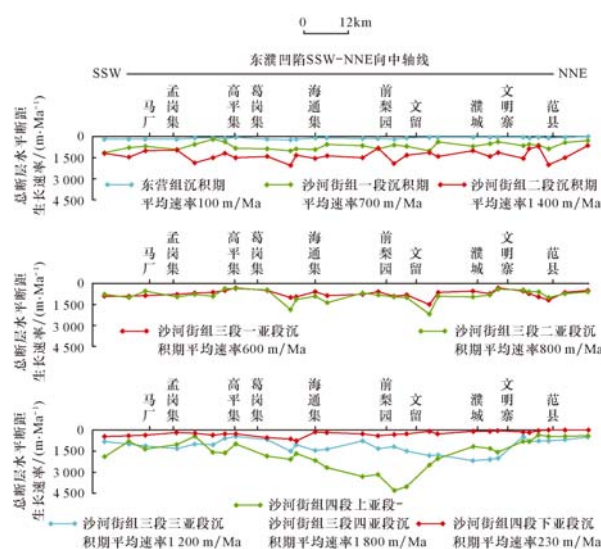


图3 渤海湾盆地东濮凹陷古近纪不同时期总水平断距生长速率<sup>①</sup>

Fig. 3 Growth rate of the total horizontal fault throw at different stages of Paleogene in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

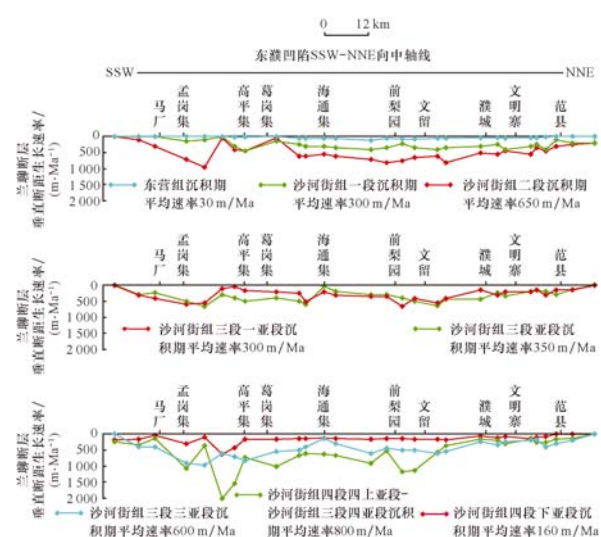


图4 渤海湾盆地东濮凹陷古近纪不同时期兰聊断层垂直断距生长速率<sup>①</sup>

Fig. 4 Growth rate of the vertical fault throw of Lanliao Fault at different stages of Paleogene in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

① 程秀申,徐振强,解晨,等.东濮凹陷构造演化与油气聚集规律研究,2005.

除兰聊断层、马厂断层和高平集断层等早期形成的断层在该期继承性活动外,该期主要形成了西倾的杜寨断层和濮城断层(图1),东濮凹陷的箕状雏形基本确立。

2) 深陷期为沙河街组四段上亚段—沙河街组三段沉积期,是东濮凹陷的主要裂陷期和扩张期,东濮凹陷的主干断层形成并强烈活动。断层的活动性呈现明显早期强晚期弱的特点,沙河街组四段上亚段—沙河街组三段四亚段沉积期为东濮凹陷古近纪断裂活动最强烈的时期,其总断层的水平断距平均生长速率高达  $1\ 800\ \text{m/Ma}$ (图3),兰聊断层的垂向断距平均生长速率高达  $800\ \text{m/Ma}$ (图4),此后断层的活动性逐渐减弱,至沙河街组三段—亚段沉积期,东濮凹陷总断层的水平断距平均生长速率降为  $600\ \text{m/Ma}$ (图3),兰聊断层的垂向断距平均生长速率降为  $300\ \text{m/Ma}$ (图4)。该期形成的西倾断层主要有黄河断层、文西断层、卫西断层和观城断层,形成的东倾断层主要有长垣断层、石家集断层、马寨断层、六塔断层和宋庙断层等(图1)。此外,东倾的文东断层和卫东断层在沙河街组三段沉积晚期也开始形成。这些断层的形成使东濮凹陷“东西分带、南北分块”的构造—沉积格局初步形成(图1)。

3) 收缩—衰亡期为沙河街组二段—东营组沉积期,是东濮凹陷断陷活动的后期,构造活动逐渐趋于停止。与深陷期断层活动的特点类似,该期的断层活动也呈现明显的早期强晚期弱的特点,但其强度较深陷期明显减弱。沙河街组二段沉积期,东濮凹陷总断层的水平断距平均生长速率为  $1\ 400\ \text{m/Ma}$ (图3),兰聊断层的垂向断距平均生长速率为  $650\ \text{m/Ma}$ (图4);至东营组沉积期,东濮凹陷的总断层的水平断距平均生长速率降至  $100\ \text{m/Ma}$ (图3),兰聊断层的垂向断距平均生长速率降至  $30\ \text{m/Ma}$ (图4)。该期断层的活动呈现2个明显的特点:一方面,前期活动的高平集断层、马厂断层、三春集断层、杜寨断层和濮城断层等在沙河街组一段沉积后期逐渐停止了活动;另一方面,主要是在中央构造带的东翼形成了一系列次一级的东倾断层,主要有马东断层、徐东断层、新东断层、玉皇庙断层等(图1),加上文东断层和卫东断层等在该期的进一步发展,使东濮凹陷南部的中央构造带初具规模,北部的中央构造带进一步得到加强。该期结束后,东濮凹陷的演化由断

陷进入坳陷阶段。

对应于古近纪渤海湾盆地的3个构造应力场反转事件和东濮凹陷构造演化的阶段性,东濮凹陷古近系可明显划分出3个超长期层序(图2),这3个超长期层序在整个渤海湾盆地范围内均可进行对比。

## 2.2 古生物演化特征

与各超长期层序的构造演化阶段相对应,东濮凹陷古近纪古生物演化也表现出明显的突变性(图2)。

1) 沙河街组四段下亚段古生物化石稀少、属种单调,均为国内外常见的陆相化石属种<sup>[21-22]</sup>。以介形类 *Cyprinotus igneus* 的发育为特征,在渤海湾盆地内分布较广、层位稳定、可对比性强。

2) 进入沙河街组四段上亚段沉积期,各门类地方性生物开始兴起,古生物属种的类型及数量较沙河街组四段下亚段沉积期明显增加,特别是以 *Cyprinotus altilis* 组合为代表的地方性介形类属种空前繁盛,形成东濮凹陷古近纪古生物的第一次大发展时期,造成沙河街组四段上亚段与沙河街组四段下亚段之间明显的古生物突变。至沙河街组三段沉积期,东濮凹陷古生物的发展则达到了古近纪的第一个高峰<sup>[21]</sup>,各门类生物属种繁多,个体丰富,以 *Huabeinia chinensis* 和 *Candona binxianensis* 为代表的地方性介形类,以及以 *Bohaidina* 和 *Parabohaidina* 为代表的地方性沟鞭藻类生物极其繁盛。

3) 沙河街组三段与沙河街组二段之间也呈明显的古生物突变,古生物演化经历了一次重大的变革。沙河街组三段沉积期发育的古生物主要是地方性属种,而沙河街组二段沉积期发育的古生物则主要为国内外常见的淡水化石属种,分布较广<sup>[21-23]</sup>。沙河街组三段沉积期属种繁盛的介形类,到沙河街组二段沉积期有67%的属种已绝灭,特别是 *Huabeinia* 和 *Candona*,同时产生的新属种占沙河街组二段介形类的65%<sup>[21]</sup>;沙河街组三段沉积期极其发育的沟鞭藻类到沙河街组二段沉积期数量大大减少,到沙河街组二段沉积晚期基本灭绝;沙河街组三段沉积期罕见的轮藻类植物到沙河街组二段沉积期却突然空前繁盛,以 *Charites producta* 组合为特征,形成了东濮凹陷古近纪轮藻类的第一个繁盛期。至沙河街组一段沉积期,东濮凹陷古生物的发展达到了古近纪的第二个发育高峰<sup>[21]</sup>。

需要说明的是,在渤海湾盆地,沙河街组二段的典型剖面选自东营凹陷北部的胜坨地区<sup>[24]</sup>,沙河街组二段下亚段含 *Huabeinia unispinata*, *Cammarocypris elliptica*, *Cypris shenglicunensis*, *Cyprois palustris*, *Tulotomoides terrassa*, *Comasphaeridium*, *Alnipollenites*, *Polypodiaceasporites* 等滨湖沼泽生物群化石,沙河街组二段上亚段含 *Cammarocypris elliptica*, *Cyprinotus xiaozhuangensis*, *Charites producta*, *Ephedripites*, *Rutaceoipollis* 等干旱型生物群化石。东濮凹陷沙河街组二段的古生物化石组合与胜坨地区沙河街组二段上亚段的古生物化石组合类似,而缺少其下亚段的古生物化石。在渤海湾盆地其它地区,包括济阳拗陷北部的沾化凹陷和车镇凹陷,以及冀中拗陷、渤中拗陷和辽河拗陷等的沙河街组二段基本也缺少胜坨地区沙河街组二段下亚段的古生物化石组合<sup>[24]</sup>。特别是在胜坨地区 *Huabeinia* 灭绝于沙河街组二段下亚段沉积的末期,而东濮凹陷的 *Huabeinia* 则灭绝于沙河街组三段沉积的末期。*Huabeinia* 的灭绝(未现面)指示始新统和渐新统的分界线,所以,在渤海湾盆地沙河街组二段典型剖面中渐新统与始新统的分界线划在沙河街组二段上亚段与沙河街组二段下亚段之间,而东濮凹陷则一直划在沙河街组二段与沙河街组三段之间。相应地,东营凹陷的沙河街组

二段上亚段和沙河街组二段下亚段之间常作为一个超长期层序的界面<sup>[25-26]</sup>,而在冀中拗陷<sup>[27]</sup>、辽河拗陷<sup>[28-30]</sup>、渤中拗陷<sup>[31]</sup>以及东濮凹陷<sup>[5-8,10]</sup>一般均将沙河街组二段的底作为一个超长期层序界面,指示其存在一个广泛的沉积间断<sup>[32]</sup>。

### 2.3 地震反射特征

东濮凹陷古近系中的超长期层序界面分别对应于沙河街组四段下亚段底、沙河街组四段上亚段底、沙河街组二段底和东营组顶,地震反射层分别为  $T_7$ ,  $T_6^4$ ,  $T_5$  和  $T_1$ , 在地震剖面上有较明显的反射特征(图5)。 $T_1$  表现为1~2个强反射同相轴,为高连续和强振幅反射,其上为空白的弱反射,其下为中低连续的弱反射,在凹陷周边与下伏地层常有削截现象,呈角度不整合接触关系,可全区对比追踪。 $T_5$  是一组较强反射的底界,为中高振幅和中低连续的反射,基本可全区追踪。 $T_6^4$  为一大套中低频、中振幅和中连续反射波组底部的一条具中振幅和中连续的反射,基本可全区追踪,其下为一近空白的弱反射。 $T_7$  为一组弱反射段底部的一条中连续和中振幅反射,在兰聊断层下降盘见与下伏中生界呈角度不整合接触,削截现象明显,可全区追踪。

东濮凹陷古近系中的超长期层序的最大湖泛

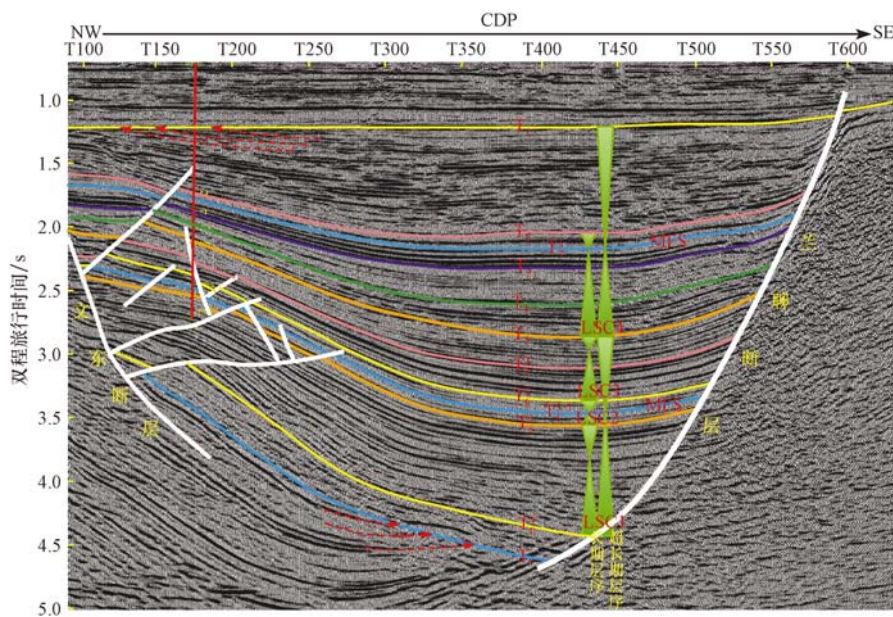


图5 渤海湾盆地东濮凹陷前梨园洼陷古近系地震层序解释剖面(Inline 210)

Fig. 5 Seismic profile showing the seismic sequences within Paleogene in Qianliyu Sub-sag of Dongpu Sag, Bohai Bay Basin(Inline 210)

面对应于沙河街组一段上亚段的下部和沙河街组三段三亚段中下部,地震反射层分别为  $T_3^1$  和  $T_6^{3-1}$  (图5)。 $T_3^1$  为一组强反射(2~4个反射轴,为沙河街组一段下亚段盐岩地层的反射特征)之上的高连续、中低振幅和低频反射,可全区追踪。 $T_6^{3-1}$  为中高连续、中弱振幅和中低频的反射,可全区连续追踪。

## 2.4 岩性特征

通过深入的地层对比和详细的岩心观察,掌握了东濮凹陷古近系发育特征。沙河街组四段下亚段为红色砂泥岩地层,俗称“低阻红层”,其顶部为一假整合面;沙河街组四段上亚段—沙河街组三段为灰色—深灰色砂泥岩夹油页岩、灰质页岩沉积,其中盐岩发育;沙河街组二段为红色砂泥岩,沙河街组二段底部为一假整合面,东营组为灰白色砂岩与棕红—灰绿色泥岩,与上覆的新近系呈明显的不整合接触关系。据沙河街组四段上亚段与沙河街组四段下亚段之间、沙河街组二段与沙河街组三段之间,以及古近系与新近系之间发育的不整合面,以及明显的地层红灰颜色的变化,可明显将东濮凹陷古近系划分为前述的3个超长期层序(图2)。

## 3 长期层序

### 3.1 构造特征

进一步从东濮凹陷古近系的总断层的水平断距生长速率(图3)和主要控制东濮凹陷形成演化的兰聊断层的垂向断距生长速率(图4)分析可知,在由沙河街组四段上亚段—沙河街组三段组成的超长期层序沉积期,东濮凹陷断层的活动呈明显的幕式变化。

1) 沙河街组四段上亚段—沙河街组三段四亚段沉积期是东濮凹陷古近纪断层活动最强烈的时期,总断层的水平断距平均生长速率达 1 800 m/Ma,兰聊断层的垂向断距平均生长速率达 8 00 m/Ma。兰聊断层活动性南强北弱(图4),东濮凹陷的沉降中心位于前梨园—文留地区(图3),沉积了近千米厚的“文23盐”<sup>[32]</sup>;

2) 沙河街组三段三亚段沉积期,断层活动性逐渐减弱,总断层的水平断距平均生长速率为

1 200 m/Ma,兰聊断层的垂向断距平均生长速率为 600 m/Ma。沉降中心向北迁移至卫城附近(图3),仅在户部寨—文明寨之间较局限的区域内沉积了一百多米厚的“卫城下盐”<sup>[32]</sup>;

3) 沙河街组三段二亚段和沙河街组三段一亚段沉积期,东濮凹陷断层活动较均衡,但活动强度较前期明显减弱(图3),总断层水平断距平均生长速率分别为 800 m/Ma 和 600 m/Ma,兰聊断层的垂向断距平均生长速率分别为 350 m/Ma 和 300 m/Ma,期间沉积的“卫城上盐”也较“卫城下盐”分布广<sup>[32]</sup>。

据此,将东濮凹陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段划分为3个长期层序,分别对应沙河街组四段上亚段—沙河街组三段四亚段、沙河街组三段三亚段、沙河街组三段二亚段—沙河街组三段一亚段(图2)。

### 3.2 岩性特征

古近纪沙河街组沉积期是东濮凹陷断陷盐湖的主要发育期,同一套连续沉积的盐岩的形成环境相同,故其在层序地层划分中具不可分割性,尤其是在长期层序和超长期层序的划分中。笔者前期通过地球化学、沉积学及构造地质学等方面的综合研究,认为东濮凹陷古近系沙河街组中发育的盐岩的成盐模式为“深水成盐”(另撰文说明)。因此,盐岩主要发育于层序的湖侵体系域和高位体系域内,而低位体系域内不发育(图2)。

东濮凹陷古近系沙河街组中主要发育的4套盐岩已被实践所证实,这4套盐岩在垂向发育序列上有着非常相似的特征,即每套盐岩的底部均发育有一段砂泥岩地层(低位体系域的主要组成部分)(图2),对应这4套盐岩将东濮凹陷古近系沙河街组四段上亚段—沙河街组一段划分为4个长期层序,分别对应于沙河街组四段上亚段—沙河街组三段四亚段、沙河街组三段三亚段、沙河街组三段二亚段—沙河街组三段一亚段、沙河街组二段—沙一段。

1) 沙河街组一段下亚段盐岩沉积发育,盐岩之下为东濮凹陷古近系砂岩最发育的沙河街组二段,为短时期内的快速沉积。从沙河街组二段—沙河街组一段的含盐岩情况分析,沙河街组二段下亚段不含盐岩,砂岩较发育,构成 LSC4 长期层序的低位体系域(图2)。沙河街组二段上

亚段在文留—户部寨的局部地区发育少量盐岩,至沙河街组一段下亚段东濮凹陷北部大部分地区均有盐岩沉积,其分布面积在东濮凹陷古近系沙河街组的4套盐岩中最大。沙河街组一段上亚段的稳定灰质泥岩沉积构成了LSC4长期层序的高位体系域,其底部的厚层稳定泥岩(沙一上亚段的2号标志层<sup>[32]</sup>)为该长期层序的最大洪泛面沉积(图2)。

2) 沙河街组三段二亚段—沙河街组三段一亚段发育的盐岩称为“卫城上盐”,盐岩之下为沙河街组三段二亚段底部广泛发育的3套砂泥岩地层<sup>[32]</sup>,构成LSC3长期层序的低位体系域(图2、图6)。沙河街组三段一亚段中部(即5—6号泥岩标志层段<sup>[32]</sup>)发育一至少50 m厚的稳定纯泥岩段,在地层对比中标志明显(图6),为该长期层序的最大洪泛面(图2、图6)。需要说明的是,在整个东濮凹陷“卫城上盐”的下部盐岩较发育,而其上部的盐岩不太发育,但在柳屯—户部寨地区,“卫城上盐”的上、下部盐岩发育均较完整,表明发育“卫城上盐”的沙河街组三段二亚段和沙河街组三段一亚段是在基本相同沉积环境下的连续沉积。前人在东濮凹陷古近系沙河街组层序划分中,均将沙河街组三段一亚段和沙河街组三段二亚段分别划分为一个长期层序<sup>[2-10]</sup>,可能主要是受岩石地层划分方案的影响。同样在渤海湾盆地其它坳陷古近系沙河街组三段的层序划分中,对应于其三段上、中、下三分的岩石地层划分方案,前人也基本都相应地将沙河街组三段划分为3个长期层序<sup>[25-31,33-35]</sup>。这种层序地层的划分与岩石地层的划分相一致的情况目前国内较普遍,值得商榷。

3) 沙河街组三段三亚段中上部发育的盐岩称为“卫城下盐”,盐岩之下为沙河街组三段三亚段下部发育的三套砂泥岩地层<sup>[32]</sup>(图2),在东濮凹陷内分布很稳定,构成LSC2长期层序的低位体系域,即使在“卫城下盐”盐岩发育较完整的剖面上亦是如此(图2),在盆地边缘地区发育有砾岩沉积,形成层序界面。该砂泥岩段之上的稳定泥岩段(即4号标志层<sup>[32]</sup>)构成该长期层序的最大湖泛面(图2)。

4) 沙河街组四段上亚段—沙河街组三段四亚段发育的盐岩称为“文23盐”,盐岩之下至少发育有100 m左右的灰色砂泥岩薄互层段<sup>[32]</sup>,构成

LSC1长期层序的低位体系域。在盆地边缘地区发育砾岩沉积,形成明显的层序界面。姚益民等<sup>[24]</sup>从冀中坳陷的廊固凹陷沙河街组三段下部*Huabeinia*发育段之下又出现600多米厚的泥质岩,其中产渤海湾盆地少见的*Limnocythere ovata*、*L. acclivicostata*等湖花介动物群,认为廊固凹陷是渤海湾盆地沙河街组三段沉积期的沉积中心,而其它坳陷的沙河街组三段与沙河街组四段大都为假整合接触关系<sup>[24]</sup>。在除东濮凹陷外的其它坳陷也大都将沙河街组三段与沙河街组四段的分界面作为长期甚至超长期层序的界面<sup>[25-31,33-35]</sup>。在东濮凹陷内,从古生物化石的角度考虑,目前将“文23盐”划归沙河街组三段四亚段和沙河街组四段上亚段两个亚段,但其中沉积的“文23盐”是相同环境下的连续沉积,且沙河街组三段四亚段底部(即0号标志层<sup>[32]</sup>)普遍发育有35~130 m厚的稳定泥岩段(图2),说明沙河街组三段四亚段与沙河街组四段上亚段之间不是层序界面,而是层序的最大洪泛面,前人也均将沙河街组四段上亚段—沙河街组三段四亚段划分为一个长期层序<sup>[2-10]</sup>。

### 3.3 地质年代特征

陆相断陷盆地层序的时限虽然变化较大,但都在一定的范围内<sup>[11]</sup>(表1),地质年代也是约束层序划分的条件之一。由于渤海湾盆地古近系发育的地方性微古生物属种达90%以上,在地层划分中难以找到与国际相对应的标准化石属种,所以,在地层划分与对比中就常存在较大的分歧。如在始新统与渐新统界线的划分上,姚益民等<sup>[24]</sup>通过生物地层、沉积、古地磁和火山岩同位素等综合分析,参考Harland等<sup>[36]</sup>确定的地层绝对年龄,认为始新统与渐新统的界线年龄大约是38.0 Ma;全国地层委员会<sup>[37]</sup>根据哺乳动物化石和古地磁研究成果,将始新统与渐新统界线的年龄定为32 Ma;国际地层表<sup>[38]</sup>根据“金钉子”——意大利海相Massignano层型剖面的研究,将始新统与渐新统界线的年龄确定为33.9±0.1 Ma;在东濮凹陷的研究中,前人均认为始新统与渐新统界线的年龄为31.2 Ma<sup>[2-4,9]</sup>,与上述各认识有较大的出入。

因天文地层年龄具有更准确的定年意义,近年来已被国际地层表所考虑<sup>[38-40]</sup>。姚益民等通过计算建立了东营凹陷新生代的天文地层年龄

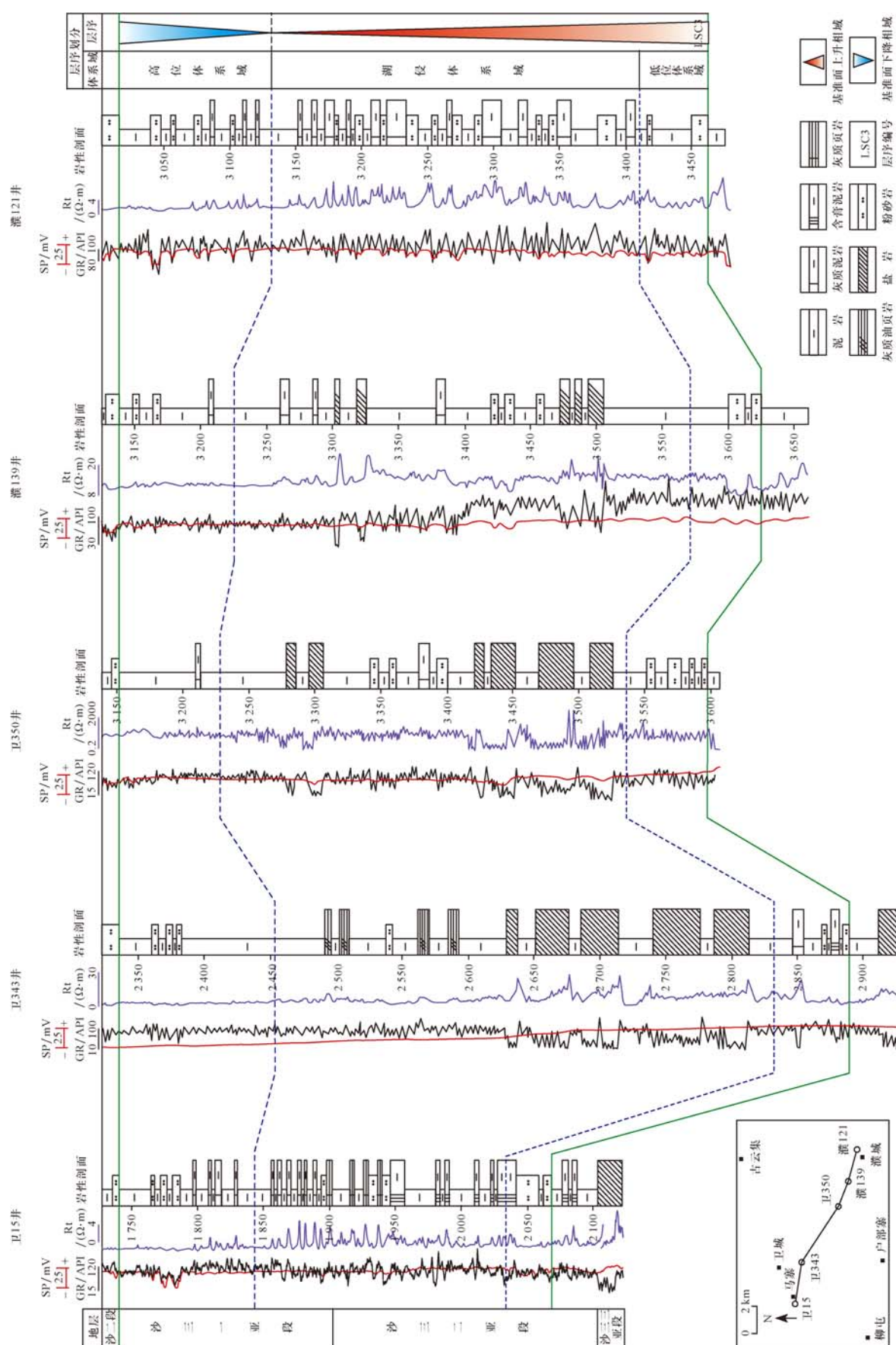


图6 渤海湾盆地东濮凹陷古近系沙河街组LSC3层序地层对比

Fig. 6 Sequence stratigraphic correlation of LSC3 of Paleogene Shahejie Formation in Dongpu Sag, Bohai Bay Basin

表<sup>[12]</sup>,它与“国际地层表”<sup>[38]</sup>所确定的地层年龄基本一致。因渤海湾盆地各坳陷发育特征相似,基本可进行对比,所以,本文采用姚益民等<sup>[12]</sup>所建立的东营凹陷新生代各地层界线年龄作为东濮凹陷古近系沙河街组层序划分的一个约束条件。东濮凹陷古近系沙河街组四段上亚段—沙河街组一段的 LSC1—LSC4 各长期层序的时限分别为 3.796,1.980,3.096,1.97 Ma(图2),符合长期层序发育的时限范围(表1)。

需要说明的是,在东濮凹陷的层序地层研究中,前人均参照岩石地层划分方案,将沙河街组二段—沙河街组一段划分为3个<sup>[5-9]</sup>或4个<sup>[2-4]</sup>长期层序。从地质年代上看,就按其当时确定的各(亚)段界线的绝对地质年龄来计算,各长期层序的时限平均为0.75~1.0 Ma,明显小于层序定义的时限范围<sup>[11,41-42]</sup>。

### 3.4 地震反射特征

东濮凹陷古近系沙河街组中的长期层序界面为沙河街组四段上亚段底、沙河街组三段二亚段底、沙河街组三段二亚段底、沙河街组二段底和东营组底,分别对应于  $T_6^4$ ,  $T_6^3$ ,  $T_6^2$ ,  $T_5$  和  $T_2$ , 其中的  $T_6^4$  和  $T_5$  长期层序界面与超长期层序界面重叠发育。 $T_2$  为一中振幅和中连续的反射,其上覆东营组底部地层为中低连续弱反射,其下伏沙河街组一段上亚段顶部为一套近空白反射,  $T_2$  可全区追踪。 $T_6^2$  为沙河街组三段二亚段底部的一个强反射,横向稳定,基本可全区追踪,其上为一组中振幅、中高连续和中高频的反射波组。 $T_6^3$  为一组中高频、中高连续和中振幅反射波组底部的一条强反射界面,基本可全区连续追踪。东濮凹陷古近系沙河街组中长期层序的最大洪泛面基本均为弱振幅、低连续和近乎空白的反射(图5)。

### 3.5 测井曲线特征

由于东濮凹陷古近系沙河街组为断陷盐湖沉积,其测井响应特征与一般淡水湖泊沉积有较大的差别,特别是在视电阻率的响应上。在一般的淡水湖泊沉积中,砂岩的视电阻率值通常要比泥岩高,但在东濮凹陷古近系沙河街组沉积中,由于泥岩中含较多的钙质及盐膏成分,致使泥岩的视电阻率值明显大于砂岩(图2,图6)。所以,对

应于砂岩较发育的低位体系域沉积,测井响应特征主要表现为自然伽马值明显偏低、自然电位呈特征的负偏、视电阻率值较低(图2,图6);层序的最大洪泛面在岩性上主要是泥页岩,测井响应特征主要表现为自然伽马值较高、自然电位呈明显的正偏、视电阻率曲线呈较平直状或起伏较大的连续的高尖状(图2,图6)。

## 4 结论

1) 东濮凹陷古近系划分为3个超长期层序,4个长期层序,后者分别对应于东濮凹陷古近系沙河街组发育的4套盐岩。

2) 东濮凹陷古近系沙河街组层序地层的划分与等时地层格架的建立不仅对成藏动力学的研究,而且对东濮凹陷的隐蔽油气藏勘探开发都具有重要的指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] 郭建华,郭成贤,翟永红,等. 东濮凹陷前梨园次注( $E_s^{3(3-4)}$ )亚段沉积旋回与沉积体系[J]. 石油实验地质, 1996,18(4):377-384.  
Guo Jianhua, Guo Chengxian, Zhai Yonghong, et al. Sedimentary cycles and depositional systems of Submember  $E_s^{3(3-4)}$  in the Qianliyuan Subdepression of the Dongpu Sag[J]. Experimental Petroleum Geology, 1996,18(4):377-384.
- [2] 黄建军,纪友亮,王改卫,等. 东濮凹陷古近系含盐地层层序特征及成因分析[J]. 石油与天然气地质, 2007,28(4):479-484.  
Huang Jianjun, Ji Youliang, Wang Gaiwei, et al. Sequence characteristics and genesis of the Eocene salt-bearing formation in Dongpu Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2007,28(4):479-484.
- [3] 杜海峰,于兴河,陈发亮. 东濮凹陷古近系沙三段盐岩成因探讨及层序地层学意义[J]. 西北地质, 2007,40(4):67-74.  
Du Haifeng, Yu Xinghe, Chen Faliang. Origin of salt-rock in Paleogene Shahejie Formation and its significance for sequence stratigraphy in Dongpu Depression[J]. Northwestern Geology, 2007,40(4):67-74.
- [4] 赵俊峰,纪友亮,苏惠,等. 东濮凹陷沙三段盐岩成因及含盐地层层序划分[J]. 海洋石油, 2009,29(1):9-15.  
Zhao Junfeng, Ji Youliang, Su Hui, et al. The salt rock genesis of 3rd member of Shahejie Formation in Dongpu Depression and the division of saline formation sequence[J]. Offshore Oil, 2009,29(1):9-15.
- [5] 任来义. 东濮凹陷下第三系生物地层与隐蔽油气藏勘探研

- 究[D].西安:西北大学,2001,23-58.  
Ren Laiyi. The study of the bio-stratigraphy and of the exploration for subtle reservoirs in Palaeogene, Dongpu Depression [D]. Xi'an: Northwestern University, 2001, 23-58.
- [6] 郑鸿稳. 东濮凹陷下第三系层序地层学模式[J]. 石油学报, 2002, 23(4): 24-28.  
Zheng Hongwen. Sequence stratigraphic methodologies of Paleogene in Dongpu Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2002, 23(4): 24-28.
- [7] 赵祥春, 纪友亮, 赵俊青. 东濮凹陷下第三系沙三段高频层序地层学模式[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(1): 6-8.  
Zhao Xiangchun, Ji Youliang, Zhao Junqing. High frequency sequence stratigraphy models of Es3 in Palaeogene system in Dongpu depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(1): 6-8.
- [8] 屈红军. 东濮凹陷濮卫洼陷含盐层系沉积层序与油气聚集规律[D]. 西安: 西北大学, 2003, 37-74.  
Qu Hongjun. Depositional sequences and oil & gas accumulating regulations of the salt-bearing system of beds in Puwei Sag, Dongpu Depression [D]. Xi'an: Northwestern University, 2003, 37-74.
- [9] 程晓玲, 周小进, 郭建华. 渤海湾盆地东濮凹陷 T-R 旋回层序地层学与隐蔽油藏研究[J]. 石油实验地质, 2003, 25(增刊): 548-552.  
Cheng Xiaoling, Zhou Xiaojin, Guo Jianhua. Study on the sequence stratigraphy of T-R Cycles and subtle oil pools in the Dongpu Depression [J]. Experimental Petroleum Geology, 2003, 25(S): 548-552.
- [10] 李健, 王德仁, 白兴盈. 东濮凹陷沙三 3-4 亚段层序地层与沉积体系分析[J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(2): 161-164.  
Li Jian, Wang Deren, Bai Xingying. Depositional system and sequence stratigraphy of S33-4 Submember in Dongpu Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(2): 161-164.
- [11] 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义[J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 249-255.  
Zheng Rongcai, Peng Jun, Wu Chaorong. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(2): 249-255.
- [12] 姚益民, 徐道一, 张海峰, 等. 山东东营凹陷新生代天文地层表简介[J]. 地层学杂志, 2007, 31(增刊 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(S2): 423-429.
- [13] Uyeda S, Miyashiro A. Plate tectonics and the Japanese islands: a synthesis [J]. Geological Society of America Bulletin, 1974, 85(7): 1159-1170.
- [14] Hilde T W C, Uyeda S, Kroenke L. Evolution of the western Pacific and its margin [J]. Tectonophysics, 1977, 38(1-2): 145-152, 155-165.
- [15] 洪汉净, 罗焕炎. 西太平洋俯冲带对中国东部构造的影响[J]. 中国地震, 1989, 5(4): 34-44.  
Hong Hanjing, Luo Huanyan. Effects of West-Pacific subduction on tectonics of Eastern China [J]. Earthquake Research in China, 1989, 5(4): 34-44.
- [16] Molnar P, Tapponnier P. Relation of the tectonics of eastern China to the India-Eurasia collision: application of slip-line field theory to large-scale continental tectonics [J]. Geology, 1977, 5(4): 212-216.
- [17] 王成善, 刘志飞, 李祥辉. 特提斯俯冲、大陆碰撞和高原隆升与沉积响应-喜马拉雅和青藏高原[C]//陈毓川. 中国地质学会 80 周年学术文集. 北京: 地质出版社, 2002, 162-172.  
Wang Chengshan, Liu Zhifei, Li Xianghui. Sedimentary response to the Tethys subduction, continental collision and plateau uplifting: the Himalaya and Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [C]//Chen Yuchuan. Academic papers of 80<sup>th</sup> anniversary of the geological society of China. Beijing: Geological Publishing House, 162-172.
- [18] 贾承造, 何登发, 陆洁民. 中国喜马拉雅运动的期次及其动力学背景[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 121-125.  
Jia Chengzao, He Dengfa, Lu Jiemin. Episodes and geodynamic setting of Himalayan movement in China [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 121-125.
- [19] Tung Y L, Lawrence A L. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia [J]. Tectonophysics, 1995, 251(1-4): 85-138.
- [20] 苏惠, 曲丽萍, 张金川, 等. 裂陷盆地构造演化及盆地伸展模式-以东濮凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 70-77.  
Su Hui, Qu Liping, Zhang Jinchuan, et al. Tectonic evolution and extensional pattern of rifted basin: a case study of Dongpu depression [J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(1): 70-77.
- [21] 魏美田. 东濮凹陷早第三纪生物记录中的地质事件[J]. 石油学报, 1992, 13(2): 77-82.  
Wei Meitian. Geological events in biological records in Eocene in Dongpu Sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 1992, 13(2): 77-82.
- [22] 张建军, 李治, 刘贤武. 东濮凹陷沙河街组盐岩成因研究[J]. 断块油气田, 1998, 5(5): 18-22.  
Zhang Jianjun, Li Zhi, Liu Xianwu. The study of genetic salt sedimentary in Dongpu Depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1998, 5(5): 18-22.
- [23] 赵志清. 东濮凹陷晚始新世至渐新世轮藻及古环境探讨[C]//车卓吾. 中原油田科技论文集. 北京: 石油工业出版社, 1995: 184-188.  
Zhao Zhiqing. Chara and palaeoenvironment discussion from Late Eocene to Oligocene in Dongpu Depression [C]//Che Zhuowu. Zhongyuan oilfield science and technology memoir. Beijing: Petroleum Industry Press, 1995: 184-188.
- [24] 姚益民, 梁鸿德, 蔡治国, 等. 中国油气区第三系(IV): 渤海湾盆地油气区分册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994, 102-144.

- Yao Yimin, Liang Hongde, Cai Zhiguo, et al. Tertiary in petroliferous regions of China(IV): The Bohai Gulf Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994, 102–144.
- [25] 李丕龙. 陆相断陷盆地油气地质与勘探[M]. 石油工业出版社和地质出版社, 2003: 1–192.
- Li Pulong. Petroleum geology and exploration of continental fault basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press and Geological Publishing House, 2003: 1–192.
- [26] 冯有良, 李思田, 邹才能. 陆相断陷盆地层序地层学研究——以渤海湾盆地东营凹陷为例[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1–207.
- Feng Youliang, Li Sitian, Zou Caineng. Study of stratigraphic sequence in continental fault basins – from Dongying Sag, Bohai Bay Basin[M]. Beijing: Science Press, 2006: 1–207.
- [27] 朱筱敏, 管守锐, 方天曙. 廊固凹陷下第三系地震地层学研究[J]. 石油实验地质, 1990, 12(2): 109–120.
- Zhu Xiaomin, Guan Shourui, Fang Tianshu. On Palaeogene seismic stratigraphy in Langgu Depression[J]. Experimental Petroleum Geology, 1990, 12(2): 109–120.
- [28] 郑荣才, 吴朝容. 西部凹陷深层沙河街组生储盖组合的层序分析[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(4): 348–356.
- Zheng Rongcai, Wu Chaorong. Sequence analysis of source – reservoir – cap rock assemblages in Shahejie Formation from deep bed of West Depression, Liaohe Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(4): 348–356.
- [29] 吴朝容, 郑荣才. 辽河油田西部洼陷沙河街组高分辨率层序地层学特征[J]. 成都理工学院学报, 1999, 26(4): 375–381.
- Wu Chaorong, Zheng Rongcai. High resolution sequence stratigraphic characteristics of Shahejie Formation in Liaohe Oil Field[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(4): 375–381.
- [30] 李德江, 朱筱敏, 董艳蕾, 等. 辽东湾坳陷古近系沙河街组层序地层分析[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(6): 669–676.
- Li Dejiang, Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, et al. Sequence stratigraphy and depositional system of Paleogene Shahejie Formation in Liaodong Bay Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(6): 669–676.
- [31] 周士科, 魏泽典, 邓宏文, 等. 渤中凹陷古近系构造层序研究[J]. 中国海上油气, 2006, 18(4): 236–240.
- Zhou Shike, Wei Zedian, Deng Hongwen, et al. A study on Paleogene tectonic sequences in Bozhong Sag[J]. China Off-shore Oil and Gas, 2006, 18(4): 236–240.
- [32] 高红灿, 郑荣才, 陈发亮, 等. 东濮凹陷北部古近系沙河街组特征[J]. 中国地质, 2011, 38(2): 356–373.
- Gao Hongcan, Zheng Rongcai, Chen Faliang, et al. Features of the Paleogene Shahejie Formation in the northern Dongpu Sag[J]. China Geology, 2011, 38(2): 356–373.
- [33] 张大智, 纪友亮, 张瑞峰, 等. 饶阳凹陷古近系层序地层研究[J]. 地质调查与研究, 2008, 31(1): 33–42.
- Zhang Dazhi, Ji Youliang, Zhang Ruifeng, et al. Research on the sequence stratigraphy of Eogene in Raoyang Depression[J]. Geological Survey and Research, 2008, 31(1): 33–42.
- [34] 严德天, 王华, 王家豪, 等. 黄骅坳陷沙河街组层序地层样式及隐蔽圈闭预测[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(1): 30–37.
- Yan Detian, Wang Hua, Wang Jiahao, et al. Sequence stratigraphic pattern and forecast of subtle reservoir of the Shahejie Formation in Huanghua Depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(1): 3037.
- [35] 苗德顺, 李秋芬, 欧阳诚. 黄骅坳陷古近系层序地层格架特征及模式研究[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 256–263.
- Miao Deshun, Li Qiufen, Ouyang Cheng. Paleogene sequence stratigraphic framework and model in the Huanghua depression[J]. Geology in China, 2008, 35(2): 256–263.
- [36] Harland W B, Armstrong R L, Craig L E, et al. A geologic time scale[M]. Cambridge: Cambridge University Press. 1982: 42–62.
- [37] 全国地层委员会. 中国地层指南及中国地层指南说明书(修订版)[M]. 北京: 地质出版社, 2001: 1–59.
- China National Commission on Stratigraphy. Chinese Stratigraphic Guide and its specification(update and enlarged edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001, 1–59.
- [38] 章森桂, 张允白, 严惠君. “国际地层表”(2008)简介[J]. 地层学杂志, 2009, 33(1): 1–10.
- Zhang Sengui, Zhang Yunbai, Yan Huijun. A brief introduction to the “international stratigraphic chart”(2008)[J]. Journal of Stratigraphy, 2009, 33(1): 1–10.
- [39] Remane J. 金玉玕, 王向东, 王玥, 译. 国际地层表(2000)[J]. 地层学杂志, 2000, 24(增刊): 插页.
- Remane J. Jin Yugan, Wang Xiangdong, Wang Yue. International stratigraphic chart(2000)[J]. Journal of Stratigraphy, 2000, 24(S): inset.
- [40] Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new Geological time scale, with special reference to Precambrian and Neogene[J]. Episodes, 2004, 27(2): 83–100.
- [41] Vail P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy; Part 1: Seismic stratigraphy interpretation procedure[A]. // Bally A W, ed. Atlas of seismic stratigraphy[C]. AAPG, Studies in Geology, 1987, 27(1): 1–10.
- [42] Posamentier H W, Jervey M T, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition I—Conceptual framework[A]. // Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G St C, et al, eds. Sea level Changes—an integrated approach[C]. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 1988, 42: 109–124.

(编辑 张亚雄)