

王青春, 贺萍, 王对兴, 等. 过程响应理论及其在湖相碳酸盐岩中的应用——以辽河西部凹陷中北部地区  $E_{s_4}$  为例[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 338–348.

Wang Qingchun, He Ping, Wang Duixing, et al. Process–response theory and its application to the Lacustrine carbonate rocks: A case study of the  $E_{s_4}$  in the mid–northern part of the western sag of Liaohe depression[J]. *Geology in China*, 2016, 43(1): 338–348(in Chinese with English abstract).

## 过程响应理论及其在湖相碳酸盐岩中的应用 ——以辽河西部凹陷中北部地区 $E_{s_4}$ 为例

王青春<sup>1</sup> 贺萍<sup>1</sup> 王对兴<sup>1</sup> 危宇宁<sup>2</sup> 武新民<sup>3</sup>

(1. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031; 2. 中国石油辽河油田公司, 辽宁 盘锦 124114;  
3. 振华石油控股有限公司, 北京 100031)

**摘要:** 过程响应理论是在地球系统科学基础上提出的一种盆地沉积学研究方法, 主要包括过程研究和响应研究两个方面, 强调盆地演化过程对其沉积过程的控制意义。论文运用过程响应理论对辽河拗陷西部凹陷中北部地区  $E_{s_4}$  碳酸盐岩进行了研究, 取得了很好的效果。研究表明, 湖相碳酸盐岩的形成和分布在时间和空间上受湖盆演化过程控制明显, 有利的地形和水动力条件、有利的气候和水介质条件、有利的物源和白云岩化条件, 这三个关键要素, 共同铸就了辽河拗陷西部凹陷中北部地区  $E_{s_4}$  湖相碳酸盐岩的沉积环境。运用过程响应理论, 综合考虑碳酸盐岩沉积作用关键三要素, 是建立更具指导作用和更具参考价值的湖相碳酸盐岩综合沉积模式的基础。

**关键词:** 地球系统科学; 过程响应理论; 碳酸盐岩; 辽河拗陷; 沉积模式

中图分类号: P588.24<sup>+</sup>5 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2016)01–0338–11

### Process–response theory and its application to the Lacustrine carbonate rocks: A case study of the $E_{s_4}$ in the mid–northern part of the western sag of Liaohe depression

WANG Qing–chun<sup>1</sup>, HE Ping<sup>1</sup>, WANG Dui–xing<sup>1</sup>, WEI Yu–ning<sup>2</sup>, WU Xin–min<sup>3</sup>

(1. *Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China*; 2. *Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin 124114, Liaoning, China*; 3. *China Zhenhua Oil Co., Ltd., Beijing 100031, China*)

**Abstract:** As a new method of basin sedimentological research, the process–response theory is based on the earth system science. This kind of method is composed of process research and response research. The controlling role of the basin evolution in the sedimentary process is emphasized in this theory. The process–response theory was successfully applied to the study of lacustrine carbonate rocks in the 4<sup>th</sup> member of Shahejie Formation ( $E_{s_4}$ ) within the mid–northern part of the western sag of Liaohe depression. The results show that the formation and distribution of lacustrine carbonate rocks are obviously controlled by basin evolution

收稿日期: 2015–04–09; 改回日期: 2015–08–03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41172118) 及河北省自然科学基金项目 (D2013403018, D2012403010) 联合资助。

作者简介: 王青春, 男, 1977 生, 博士, 副教授, 主要从事储层沉积学及沉积盆地流体矿产研究和教学工作; E-mail: wangqingchun@sina.com。

process in time and space. Based on the study of the  $Es_4$  in the mid-northern part of the western sag of Liaohe depression, the authors hold that the sedimentary environment of lacustrine carbonate rocks has three key points. The first one is the suitable topography and hydrodynamic conditions. The second one is the favorable climate and water media, and the last one is the rich provenance supply and the dolomitic conditions. The application of the process-response theory, together with the research on the three key points and the comprehensive sedimentary model of lacustrine carbonate rocks, constitutes the basis for establishing the composite sedimentary model with more reference and guidance value.

**Key words:** earth system science, process-response theory, carbonate rocks, Liaohe depression, sedimentary model

**About the first author:** WANG Qing-chun, male, born in 1977, doctor, associate professor, mainly engages in the study and teaching of reservoir sedimentology and fluid minerals in sedimentary basin; E-mail: wangqingchun@sina.com.

**Fund support:** National Natural Science Foundation of China (No.41172118) and Natural Science Foundation of Hebei Province of China(No.D2013403018, D2012403010).

地球系统科学,始于1980—1990年代,其核心是把地球看做一个系统和整体进行分析研究,站在全局角度来认识和思考地质问题,从宏观角度把握地质事件的特征和本质<sup>[1-3]</sup>。

随着系统地质思维模式的不断发展和完善,其实际意义不断得以体现,王正和<sup>[4]</sup>、和政军等<sup>[5]</sup>、林畅松<sup>[6]</sup>等均开展了一系列研究工作,笔者等<sup>[7-9]</sup>也就湖盆演化过程对层序地层、沉积特征、沉积储层方面的控制意义进行了一些探讨,并对前人研究进行了归纳和总结,初步提出了过程响应理论<sup>[10]</sup>。

作为地球系统科学的延伸,过程响应理论同样认为沉积盆地是一个整体,其构造演化过程对层序地层序列、沉积充填方式、沉积储层发育等均具有明显的控制作用。在实际应用过程中过程响应理论主要包括过程研究和响应研究两个方面。过程研究的重点在于湖盆演化过程的重塑,明确不同地质时期地质应力特点或湖盆构造演化规律;响应研究是在过程研究建立的框架下进行的,主要分析湖盆不同演化阶段的层序地层学特征、沉积地质学特征、储层地质学特征等内容,最后综合分析并建立过程响应模式<sup>[10]</sup>。

目前地质学家对于湖相碳酸盐岩的研究较为欠缺<sup>[11]</sup>,尤其是针对湖相碳酸盐岩成因及沉积模式的研究较少。论文以辽河拗陷西部拗陷中北部地区  $Es_4$  为研究对象,运用过程响应理论,对湖相碳酸盐岩沉积作用进行了探讨。

## 1 地质背景

辽西拗陷为辽河拗陷西部拗陷的简称。辽河拗陷位于渤海湾盆地的东北角,郯庐断裂贯穿其

间,构造演化既具继承性,又有新生性<sup>[12,13]</sup>(图1)。西部拗陷为辽河拗陷西部的次级构造单元,同时也是重要的油气富集拗陷<sup>[11]</sup>。西部拗陷中北部包括牛心坨隆起、牛心坨洼陷、台安洼陷和高升斜坡4个三级构造单元,由基底和新生代盖层构成<sup>[7-8]</sup>(图1)。古近系沙河街组第四段( $Es_4$ )沉积包括牛心坨油层( $Es_4^3$ )、高升油层( $Es_4^2$ )和杜家台油层( $Es_4^1$ )共三套沉积地层,是重要的油气富集层位,其中碳酸盐岩发挥着重要作用。

辽河拗陷西部拗陷新生代的构造演化历史可划分为初始裂陷、伸展断陷、挤压拗陷3个阶段,其中古近纪早中期为湖盆伸展断陷阶段的深陷期<sup>[7-10]</sup>,  $Es_4$  沉积地层形成于深陷期早期,此时研究区已具状断陷的雏形<sup>[11]</sup>,湖盆演化过程经历了初始断陷阶段→快速沉降阶段→稳定沉降阶段,分别发育了低位体系域(LST)、水进体系域(TST)和高位体系域(HST),基本与  $Es_4^3$ 、 $Es_4^2$  和  $Es_4^1$  沉积地层对应<sup>[7-10]</sup>。由于古隆起的隔挡作用,加之湖盆不同演化阶段的古地貌特征各异,研究区湖泊沉积环境受到限制<sup>[11]</sup>,水体较浅,湖泊水动力条件较弱,滨浅湖亚相较为发育<sup>[7-10]</sup>。

西部拗陷中北部  $Es_4$  滨浅湖亚相以浅红色、灰黄色、浅灰色泥岩、碳酸盐岩、灰质泥岩和灰质页岩为主。其中碳酸盐岩发育页理和斜层理等沉积构造,岩石表面有溶蚀现象,裂缝发育,主要包括泥质灰岩、云质灰岩和泥质云岩、灰质云岩等,此外还可见代表着较强水动力条件的鲕粒灰岩。在电性上,发育有碳酸盐岩的层段,自然电位曲线幅度较高,电阻率曲线表现为尖峰状高值(图2),声波时差较低,比较容易与顶底部泥岩和内部所夹泥岩、油页岩区

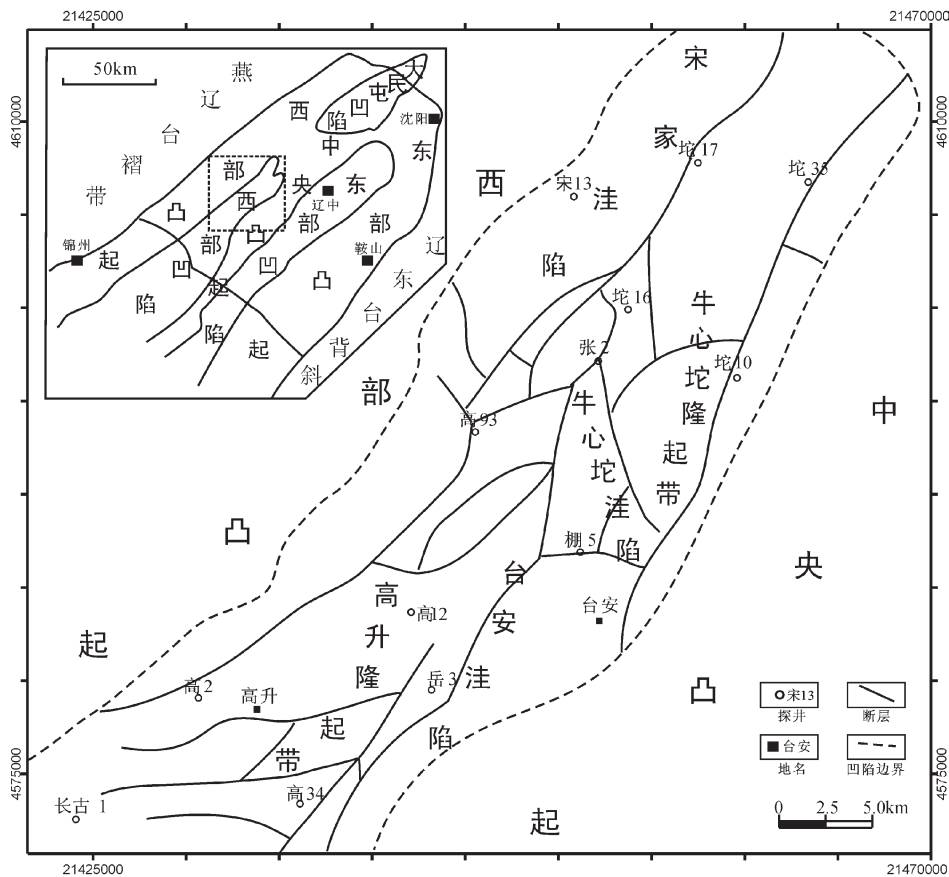


图1 辽河拗陷西部凹陷中北部地区大地构造位置及构造单元略图<sup>[7-10]</sup>

Fig.1 Tectonic setting and structural units of the mid-northern part of the western sag of Liaohede depression

分和对比。研究区碳酸盐岩的地震发射特征也比较明显,内部反射是弱反射或无反射的空白区,底界一般以平行连续的强振幅低频反射(玄武岩基底)为特征,顶界为亚平行不连续的弱振幅低频反射<sup>[11]</sup>。

地层对比表明,研究区Es<sub>4</sub>发育有多套可在区域上进行对比的碳酸盐岩小层,大多具有形成良好油气储层的潜力,其中高升地区发育的高升油层最具说服力。高升油层是在广泛分布的玄武岩沉积基底上发育的,主要岩性为鲕粒灰岩,少数为泥质灰岩,厚度5~46.5 m,平均13.7 m,粒间孔隙、粒间溶孔、裂隙等储集空间都很发育,后期随着水体的进一步加深沉积了几十至三四百米厚的暗色泥岩、油页岩等,具备形成良好的岩性油气藏的潜力。勘探实践更是证实了这一情况,钻遇鲕粒灰岩的多口探井均具有良好的油气显示,高升油层的碳酸盐岩已然成为了高升油田的主力产油层位。

## 2 湖盆演化过程对湖相碳酸盐岩垂向分布的影响

在古新世房身泡组玄武岩喷溢之前的晚中生代,辽河拗陷就进入了环太平洋构造热隆起的裂陷构造发育阶段,辽河拗陷西部凹陷中北部地区乃至整个中国的东部发育了一系列大小不等的断陷盆地群。在断陷盆地内,陆相火山-碎屑沉积比较发育<sup>[13]</sup>。

进入古新世初期,辽河拗陷西部凹陷中北部地区构造裂陷作用进一步加剧,郯庐断裂带在高升地区剧烈活动,沿断裂带发生了强烈的火山喷溢,并在高升地区形成了玄武岩古隆起,构造高点位于高17井—高古1井一线,呈鼻状古地貌向北、东、南三个方向倾没。

根据湖盆演化特点,研究区进入Es<sub>4</sub>沉积时期,水体是一个逐步加深的过程,随着水体的变化,沉

积环境氧化性逐渐变弱,还原性逐渐增强,沉积体系也由初期干旱浅水环境中发育的冲积扇相逐步向水体较深的半深湖环境中发育的浊积扇、扇三角洲相过渡。通过精细单井沉积相研究,结合前人研究成果<sup>[13-18]</sup>,论文建立了研究区湖相碳酸盐岩沉积综合柱状图(图2)。

### 2.1 湖盆初始断陷阶段

湖盆初始断陷阶段,辽河拗陷西部凹陷中北部地区气候干热,水体较浅。Es<sub>4</sub>沉积之前,研究区以高升地区为中心喷溢发育的多期玄武岩,形成了高升古隆起,因而仅有北部牛心坨地区在前古近一新近纪基底上发育的小型凹地被湖水覆盖并接受了沉积。在干热气候条件下,加之牛心坨东侧主边界断裂活动引起的中央凸起与湖盆之间有较大的高差,河流携带大量从中央凸起剥蚀而来的花岗岩碎屑物质,在坡度陡降而流速骤减的情况下,于牛心坨地区形成了冲积扇沉积。在湖盆初始断陷阶段后期,湖盆继续沉降,水域进一步扩大,滨浅湖环境不断扩张,碎屑物源供给有所减弱,浅灰色灰质泥岩、灰质白云岩、白云质泥岩、白云岩等浅水碳酸盐岩沉积开始发育(以坨12井为例(图2))。

### 2.2 湖盆快速沉降阶段

湖盆快速沉降阶段,研究区水体逐渐加深,湖泊从北部不断向南部扩张,台安洼陷乃至高升斜坡区都开始接受沉积,沉积范围比较广阔,但由于此时水体北深南浅,因此研究区南北沉积环境存在较大差异,北部以半深湖—浊流沉积为主,南部则以滨浅湖沉积为主,碳酸盐岩发育。以高34井为例(图2),主要发育有灰色—深灰色的灰质泥岩、泥岩与油页岩,呈互层状分布。

### 2.3 湖盆稳定沉降阶段

经过进一步演化,研究区东侧的台安东主边界裂陷幅度加大,西侧逐渐抬升,牛心坨洼陷继续下沉,台安洼陷已具雏形。湖盆进入稳定沉降阶段,湖盆水体进一步加深,物源供给已不再单纯的依靠东侧的中央凸起,西部凸起也开始向研究区提供碎屑物供给。碳酸盐岩主要发育在前期沉积物形成的水下正地形之上。依然以高34井为例(图2),发育有浅灰色、灰褐色灰质泥岩、泥质灰岩夹薄层灰褐色油页岩,后期沉积灰白色、灰绿色泥岩夹薄层砂砾岩。

## 3 湖盆演化过程对湖相碳酸盐岩平面分布的影响

辽河拗陷西部凹陷中北部地区的沉积基底形成之后,接受了大套的新生代沉积地层。作为一个北东—南西向延伸的狭长凹陷,虽然其内部构造复杂且南北构造背景和沉积环境有所差异,但从整体上而言,由于盆地短轴方向临近西部凸起和中央凸起,因而其主要的物源方向为东西两侧<sup>[19]</sup>,碳酸盐岩则主要发育在基岩古隆起或先期沉积物形成的水下正地形上。

### 3.1 湖盆初始断陷阶段

湖盆初始断陷阶段,研究区台安断裂在北部牛心坨地区先期活动,在前古近一新近纪基底上发育了近北东向小型断陷湖盆,面积较小,低水位体系域开始沉积。湖盆形成初期,断裂活动频繁,气候干旱,湖泊水体较浅,主要为滨浅湖环境,水域面积局限,仅覆盖了研究区北部牛心坨洼陷区,南部高升地区出露地表遭受剥蚀。沉积和沉降中心均靠近牛心坨洼陷。

该阶段主要发育有冲积扇相、浊积扇相及湖泊相沉积<sup>[9]</sup>。沉积初期,水体较浅,在牛心坨东主边界断裂的控制下,粗碎屑沉积以冲积扇相最为发育,覆盖了牛心坨地区的大部分区域。湖盆沉积中后期,随着沉降幅度的加大,水域面积加大,水体加深,局部地区出现了半深湖沉积环境;同时在湖水加深和沉积物供给量相对减少等多种因素促使下,在前期形成的冲积扇体远端及水下地势较高的部位,水体相对清浅安静,因而沉积了碳酸盐岩。文中将石灰岩或白云岩在地层中的百分含量超过10%的区域划归为灰(云)坪,百分含量在5%~10%的区域划归为准灰(云)坪,其中坨4井—坨6井—坨12井区发育了泥质云坪,坨17井区发育了灰质云坪,而坨16井区发育了泥(云)质灰坪(图3)。

### 3.2 湖盆快速沉降阶段

湖盆快速沉降阶段,研究区边界同生断裂活动进一步加剧,北部的牛心坨洼陷与南部的台安洼陷已经连通,湖侵体系域迅速发育<sup>[8]</sup>,北部牛心坨地区水体进一步加深,发育了一套以厚层深灰色泥岩、薄层油页岩、局部夹灰质或白云质泥岩为主的深水沉积,局部地区发育浊积扇沉积<sup>[8]</sup>。

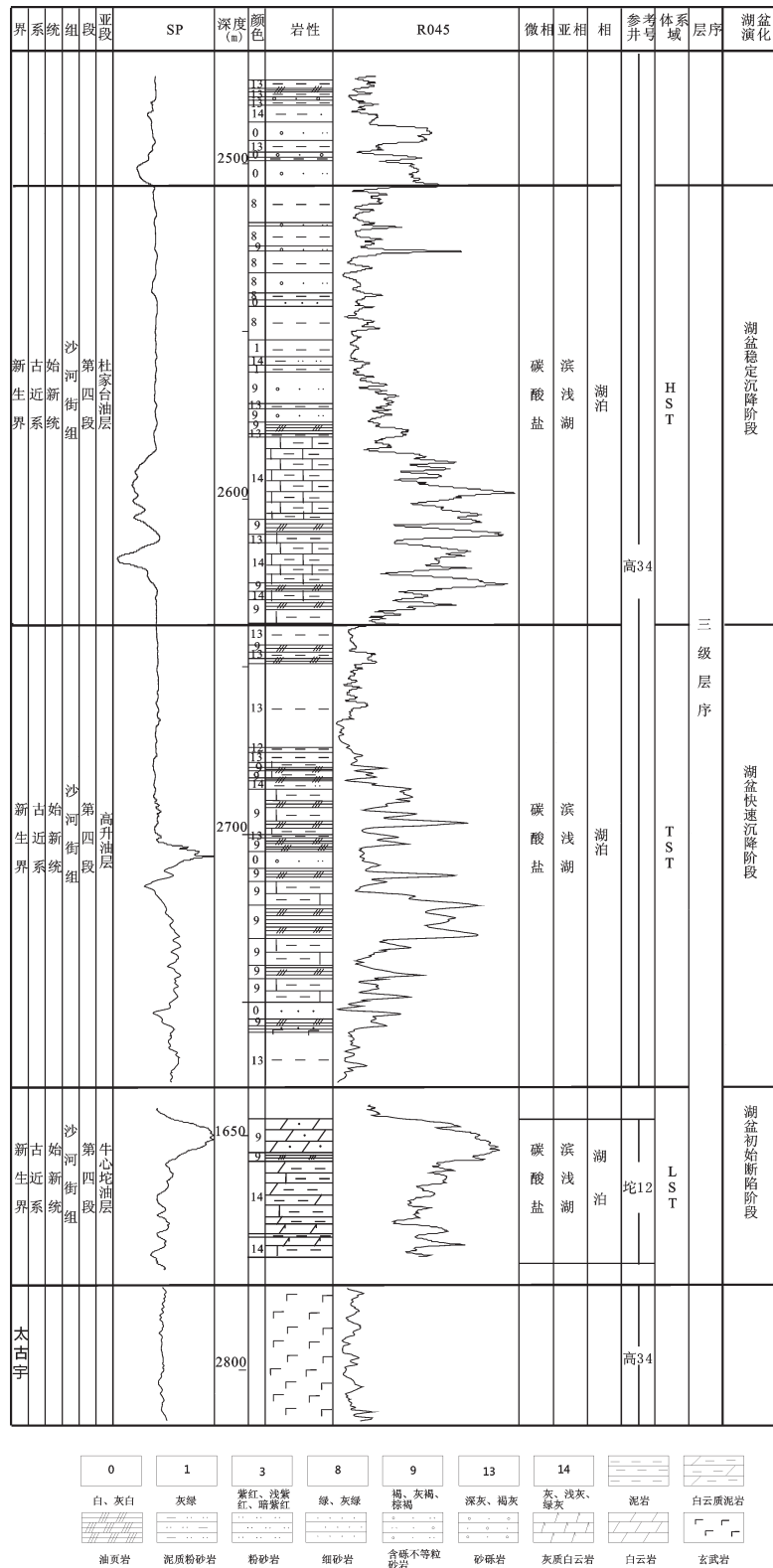


图2 辽河拗陷西部凹陷中北部地区Es<sub>4</sub>碳酸盐岩沉积综合柱状图

Fig.2 Comprehensive columnar section of carbonate rocks, the Es<sub>4</sub> of the mid-northern part of the western sag of Liaohe depression

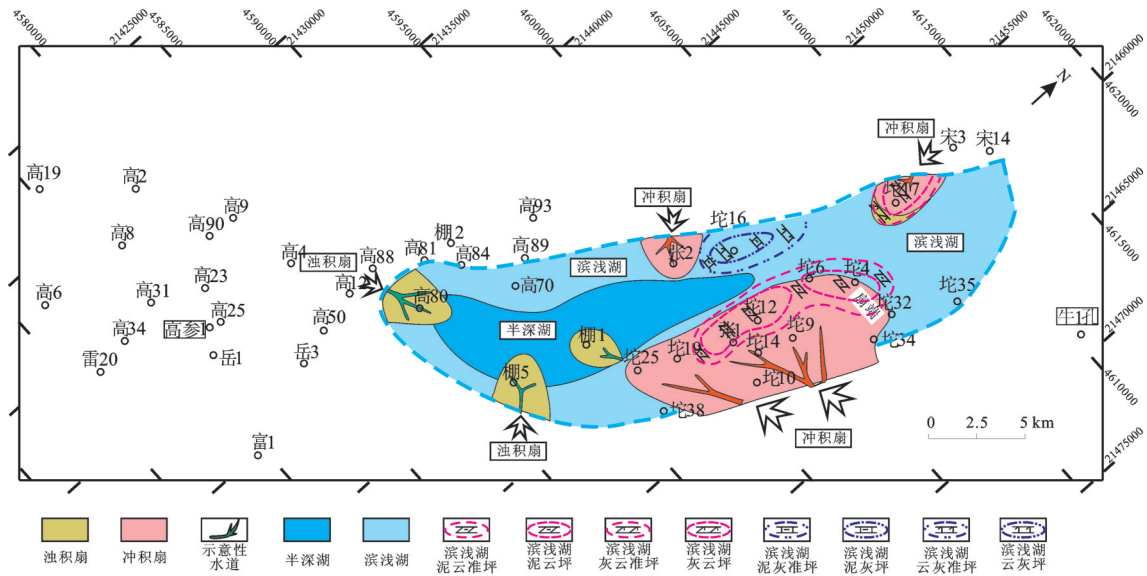


图3 辽河拗陷西部拗陷中北部地区湖盆初始断陷阶段沉积相平面图

Fig.3 Sedimentary facies at the initial faulted stage of the mid-northern part of the western sag of Liaohe depression

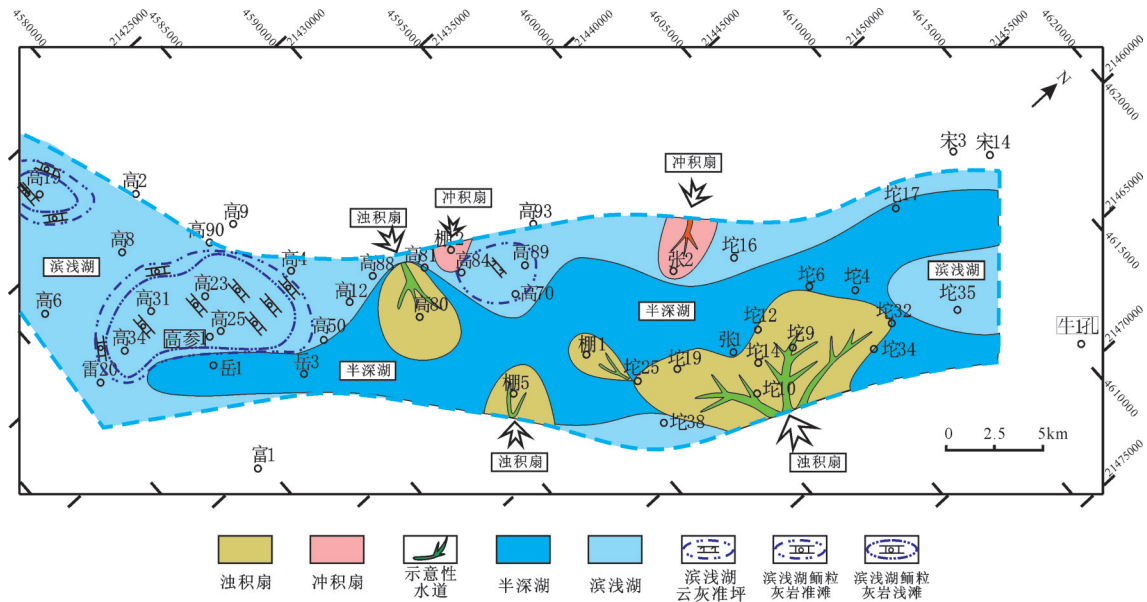


图4 辽河拗陷西部拗陷中北部地区湖盆快速沉降阶段沉积相平面图

Fig.4 Sedimentary facies at the fast subsiding stage of the mid-northern part of the western sag of Liaohe depression

值得注意的是,进入湖盆快速沉降阶段后,随着水体的加深,南部高升地区玄武岩喷溢后形成的古隆起也开始接受沉积。由于古隆起的遮挡作用,加上局部气候条件的影响,注入水系水动力条件较弱,造成了碎屑物源供给不足,使得高升地区成为相对比较封闭的水体清浅安静的沉积环境,沉积了大量的碳酸盐岩<sup>[8]</sup>。根据钻井揭露情况,高升地区

底部一般以鲕粒石灰岩为主,其次为泥质灰岩,厚度5~46.5 m,平均13.7 m,本文将鲕粒灰岩占地层总厚度的百分含量超过10%的区域划归为鲕粒滩,含量在5%~10%的区域划归为鲕粒准滩,其中鲕粒滩发育在高23井—高25井—高34井区和高19井区,其边缘为鲕粒准滩,另外高89井—高84井区还发育了灰云准坪(图4)。

### 3.3 湖盆稳定沉降阶段

湖盆稳定沉降阶段,研究区东侧台安边界断裂活动加强,西侧逐渐抬升,沉降中心明显向南迁移,湖盆继续下陷,水体不断加深,水域不断扩大,高升斜坡区也开始接受陆源碎屑沉积。由于控制台安洼陷的主干断裂的活动性增强,台安洼陷开始扩张加深呈箕状断陷形态,并与牛心坨洼陷完全接合。整个研究区开始发育高位体系域沉积,有扇三角洲相、辫状河三角洲相、浊积扇相和湖泊相<sup>[9]</sup>。

根据钻井揭露情况,湖盆稳定沉降阶段碳酸盐岩主要发育南部高升地区,如高84井区、高12井区、高25井区和高19井区,在前期扇三角洲或浊积扇形成的局部水下正地形之上发育了灰云准坪;而在高4井区和高31井区则在浅水环境中发育了泥(云)质灰坪,且周缘较广范围发育了准灰坪(图5)。

## 4 湖相碳酸盐岩沉积的成因及沉积模式

### 4.1 湖相碳酸盐岩沉积的成因

#### 4.1.1 有利的地形和水动力条件

辽河拗陷西部拗陷中北部地区Es<sub>4</sub>沉积的各个湖盆演化阶段,均有碳酸盐岩发育,主要形成于滨浅湖环境以及半深湖环境的水下正地形或基底古隆起上,岩性以泥质灰岩、鲕粒灰岩、云质灰岩和泥质云岩、灰质云岩为主,颜色主要为褐灰色、浅灰

色,常呈薄层状夹于泥岩中分布,见韵律层理。

其中高升地区形成的鲕粒灰岩是辽河拗陷西部凹陷中北部地区典型的碳酸盐岩发育区。这套鲕粒灰岩形成于湖盆快速沉降阶段,下与基底玄武岩被相邻,主要为假鲕和表鲕,后期多为泥质灰岩、云质灰岩沉积。湖盆快速沉降阶段,高升地区在水进过程中逐渐被水体覆盖,但由于前期火山喷发作用形成了玄武岩古隆起,因而水体较为清浅,甚至有时出露水面,这样在湖浪和湖流的作用下,初期形成的生物泥、陆源碎屑等物质就会发生往复滚动,在适宜的水动力条件和介质条件下与钙离子结合沉积,发育成了鲕粒滩。

其他地区的灰岩形成也都具备类似的条件,如湖盆初始断陷阶段坨16井区的泥灰坪(图3)是在前期的玄武岩古隆起上形成的;湖盆快速沉降阶段高89井—高84井区的云灰坪(图4)则形成于滨浅湖湖湾环境;湖盆稳定沉降阶段的泥灰坪和云灰坪沉积环境(图5)则形成于滨浅湖环境。

由此可见,玄武岩古隆起发育区(属于水下正地形)和滨浅湖(湖湾)环境,具备碳酸盐岩形成的有利地形和水动力条件,是研究区碳酸盐岩沉积的主要区域。

#### 4.1.2 有利的气候和水介质条件

孢子分析表明<sup>[13,18]</sup>,辽河拗陷西部拗陷始新世杉科、麻黄粉属含量较高,湖盆初始断陷阶段杉科

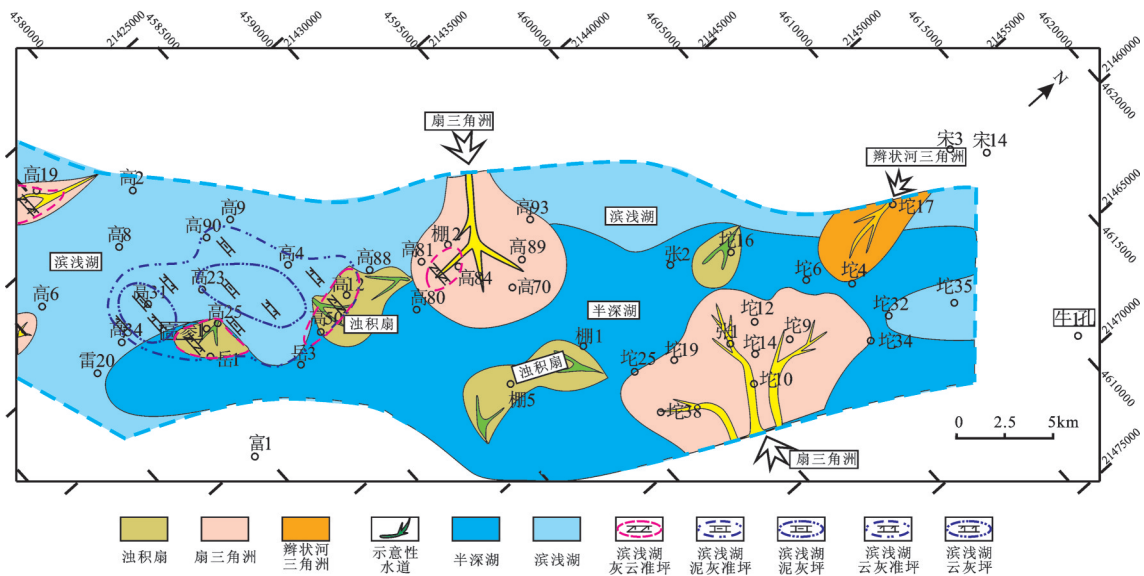


图5 辽河拗陷西部拗陷中北部地区湖盆稳定沉降阶段沉积相平面图

Fig.5 Sedimentary facies at the stable subsiding stage of the mid-northern part of the western sag of Liaohé depression

含量高达50%,个别井麻黄粉属含量可达14.2%,代表着干旱炎热环境;介形类中出现了美星介属、南星介属这类微咸水中的常见化石,其中南星介属的出现则证实当时水体极浅。

微量元素中硼是反映盐度的一项较好的指标,淡水中不含硼。资料显示<sup>[18]</sup>,研究区Es<sub>4</sub>泥岩中硼的含量为 $6\times 10^{-6}$ ~ $165\times 10^{-6}$ ,一般为 $42\times 10^{-6}$ ~ $66\times 10^{-6}$ ,而海相沉积物中的硼含量 $>100\times 10^{-6}$ ,潟湖泥岩中硼的含量更高,这说明Es<sub>4</sub>沉积时期湖盆水体盐度较高,但并不太高。

Sr/Ba是反映沉积水介质的又一个重要指标,淡水与海水混合时淡水中的Ba<sup>2+</sup>会与海水中的SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>相结合而发生沉淀,SrSO<sub>4</sub>溶解度加大,因此淡水中的Sr/Ba通常 $<1$ ,而海水中则 $>1$ 。分析表明<sup>[18]</sup>,研究区Es<sub>4</sub>泥岩中的Sr/Ba均值 $<1$ ,湖盆初始断陷阶段、快速沉降阶段和稳定沉降阶段的Sr/Ba均值分别为0.915、0.63、0.66,说明湖盆水体在初始断陷阶段盐度较高,随着湖盆的演化水体加深,淡化现象明显。

由此可见,研究区Es<sub>4</sub>沉积时期的水介质属于淡水环境并具有微咸水的一些沉积特征,水体清浅,生物活动频繁,这种水介质条件非常有利于碳酸盐岩的形成。

#### 4.1.3 有利的物源和白云岩化条件

地质工作者在研究陆源碎屑岩沉积时,不可避免地要讨论其物源问题,但在碳酸盐岩研究过程中却很少涉及该问题。本论文认为,任何类型的沉积岩,在研究过程中,都应首先综合考虑物质来源问题,碳酸盐岩也应如此,既要研究形成碳酸盐矿物的钙镁离子是否充足,又要研究陆源碎屑沉积作用的影响程度。

辽河拗陷西部凹陷中北部地区,在湖盆伸展断陷阶段深陷期早期,具备较为有利的碳酸盐岩物源条件。首先是下伏地层具有分布广泛的火山岩尤其是玄武岩岩被,其在湖水浸润作用下发生溶解可以为水体提供丰富的钙镁离子及碳氧离子;其次为周边古老碳酸盐沉积物发生机械破碎后被携入湖也易于溶离出丰富的钙镁离子;再次就是河流体系从源区可携带部分钙镁物质入湖;另外滨浅湖(湖湾)环境以及水下正地形环境,水体清浅,有利于生物生存,生物的新陈代谢也能提供少量物质来源。水体中具备了丰富的钙镁离子,当陆源碎屑沉积作

用的干扰足够弱时,碳酸盐岩沉积作用开始进行,因而研究区在整个Es<sub>4</sub>沉积过程中,在水动力条件较弱的滨浅湖(湖湾)环境以及水下正地形发育区均有一定规模的碳酸盐岩沉积形成。

白云岩化条件是白云岩研究的一个重要内容。研究区白云岩沉积较少,泥质及有机质含量偏高,多为泥质云岩、灰质云岩或以云质形式存在于灰岩、泥岩中,发育纹理及韵律层理,岩心观察还可见生物搅动和包卷层理等构造特征,说明白云岩形成时水体极浅,局部甚至出露水面。白云岩多与泥岩或过渡类型的灰岩共生,纯度低,呈薄层状夹于泥岩中存在,说明沉积过程中水体季节性变化较大。白云岩主要分布于先期沉积的扇体之上,如湖盆初始沉降阶段坨17井区的灰质云坪和坨4井一坨6井一坨12井区的泥质云坪(图3)均发育在先期形成的冲积扇扇缘上;湖盆快速沉降阶段高84井区、高12井区、高25井区和高19井区的灰质云坪则形成于先期形成的扇三角洲前缘或浊积扇上。这种先期沉积的扇体形成水下正地形,造成了局部的浅水环境。浅水中生物作用强烈,光合作用消耗水中的CO<sub>2</sub>从而加快OH<sup>-</sup>和游离氧的结合,促使钙镁离子活度提高,进而促进HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>的分解,形成碳酸盐中钙镁离子有序的排列并沉淀下来。对于淡水中白云岩的形成,著名学者B.C福克认为,在低盐度的淡水中,由于竞争离子较少,所以当Mg<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup>比值近似于或大于1时就能缓慢结晶形成钙镁离子的有序排列。辽河拗陷西部凹陷中北部地区在Es<sub>4</sub>沉积时期水体盐度较低,偏碱性,钙镁离子物源充足,前期沉积物形成的水下正地形具有水体清浅的沉积环境,具备了白云岩的形成条件。

综上所述,有利的地形和水动力条件、有利的气候和水介质条件、有利的物源和白云岩化条件,是湖相碳酸盐岩沉积作用发生的关键三要素,另外白云岩的形成需要更加严格的水介质条件和古地理环境。

#### 4.2 湖相碳酸盐岩沉积模式

盆地沉积模式是对盆地沉积过程、沉积环境及沉积体系等时空配置的概括。沉积模式的建立可以为同类沉积环境的沉积相研究工作提供一定的参考作用,对于类似沉积环境的沉积学理论研究也应具有相应的指导作用。



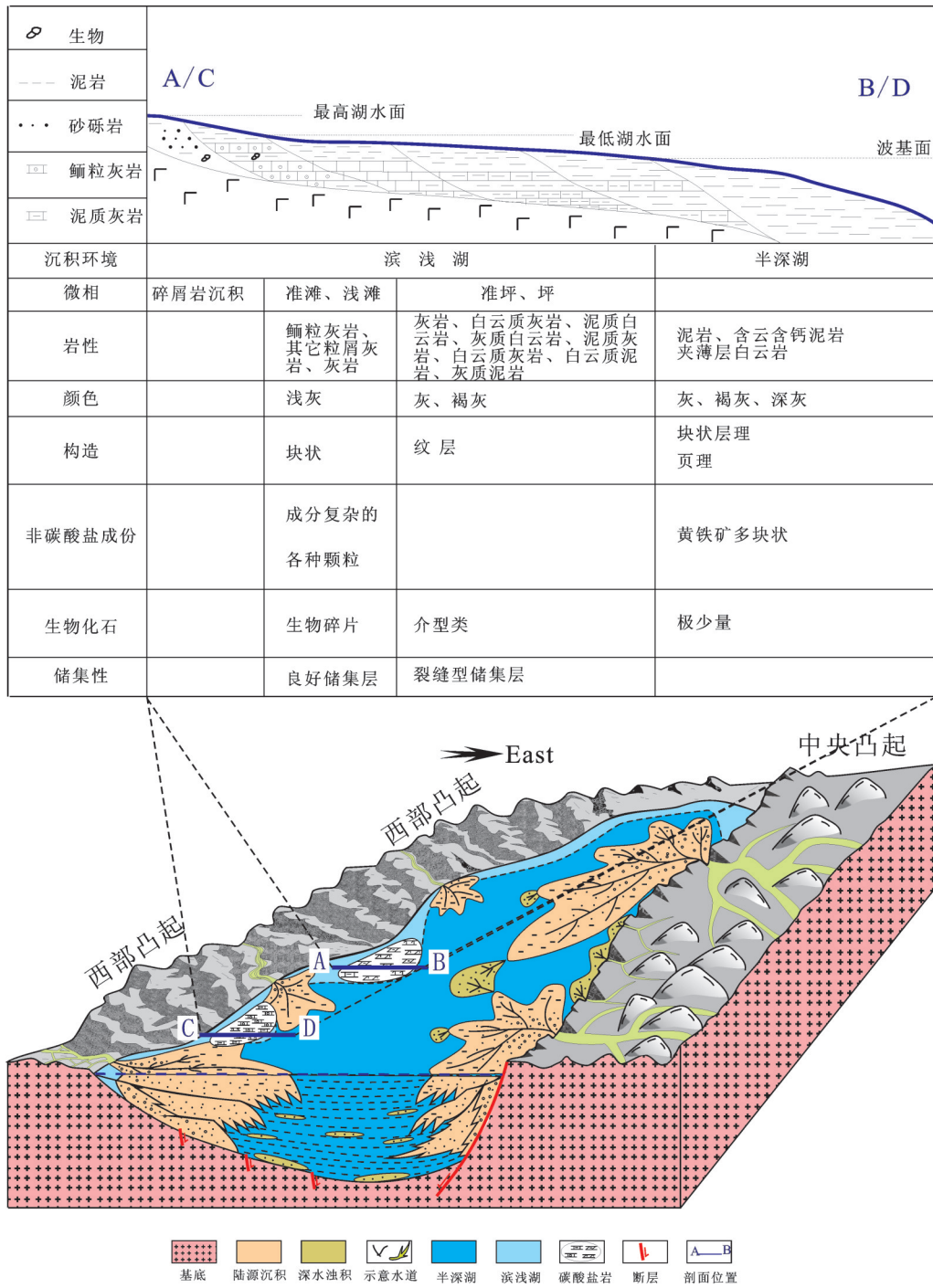


图6 辽河拗陷西部凹陷中北部地区Es<sub>4</sub>湖相碳酸盐岩过程响应沉积模式图

Fig.6 Process-response sedimentary model of lacustrine carbonate rocks, the Es<sub>4</sub> of the mid-northern part of the western sag of Liaohe depression

湖相碳酸盐岩沉积模式的建立难度较大,需要在湖相碎屑岩沉积模式的基础上,进一步研究碳酸盐岩的形成条件、分布特点以及碎屑岩与碳酸盐岩之间的相互影响等因素。结合前人研究成果<sup>[7-19]</sup>,以过程响应理论为指导,以湖盆演化过程为主线,论文建立了辽河拗陷西部凹陷中北部地区 E<sub>s4</sub> 湖相碳酸盐岩过程响应沉积模式(图6)。

沉积模式由上下两部分组成(图6)。下部为立体沉积模式,简单展示了整个研究区的原始地形地貌特征及沉积物(包括陆源碎屑岩和碳酸盐岩)空间配置关系,并示意性地标注了碳酸盐岩在平面上的主要发育位置。上部为碳酸盐岩剖面沉积模式,箕状断陷西缓东陡,自西向东直到沉积中心,碳酸盐岩颗粒从粗到细,厚度由薄变厚再变薄,鲕粒碳酸盐岩(属于粒屑灰岩)发育于近岸水下隆起(正地形)区域,灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩等发育于滨浅湖斜坡区域,泥岩等发育于半深湖较深水区域,沉积相带沿沉积中心的长轴方向呈带状展布。

## 5 结论

(1)过程响应理论是一种盆地沉积学研究方法,主要包括过程研究和响应研究两个方面,过程响应理论对湖相碳酸盐岩研究具有重要的指导意义,湖盆演化过程对湖相碳酸盐岩的形成具有明显的控制作用。

(2)有利的地形和水动力条件、有利的气候和水介质条件、有利的物源和白云岩化条件,是湖相碳酸盐岩沉积作用发生的关键三要素,另外白云岩的形成需要更加严格的水介质条件和古地理环境。

(3)运用过程响应理论,综合考虑碳酸盐岩沉积作用关键三要素,是建立能够反映综合信息的湖相碳酸盐岩过程响应沉积模式的有效方法。

### 参考文献(References):

- [1] 毕思文. 地球系统科学综述[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 504-514.  
Bi Siwen. Summarization on Earth system science[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(3): 504-514.
- [2] 白屯. 认识复杂的地球[J]. 自然辩证法研究, 2005, 21(8): 1-13.  
Bai Tun. Understanding the Complicated Earth[J]. Studies in Dialectics of Nature, 2005, 21(8): 1-13(in Chinese).
- [3] 狄丽颖, 冯银珍, 张爱国. 地球系统科学研究进展[J]. 河南理工大

- 学学报(自然科学版), 2007, 26(3): 267-271.  
Di Liying, Feng Yinzhen, Zhang Aiguo. Research progress on earth system science[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2007, 26(3): 267-271(in Chinese with English abstract).
- [4] 王正和. 沉积盆地中的两种沉积响应模式[J]. 地球学报, 2008, 29(1): 103-108.  
Wang Zhenghe. Two types of Sedimentary Response in Basin[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(1): 103-108(in Chinese with English abstract).
- [5] 和政军, 牛宝贵, 张新元. 冀西北尚义盆地晚侏罗世构造活动的沉积响应[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 181-195.  
He Zhengjun, Niu Baogui, Zhang Xinyuan. Sedimentary response of the Shangyi basin, northwestern Hebei, to the late Jurassic tectonism[J]. Geology in China, 2008, 35(2): 181-195(in Chinese with English abstract).
- [6] 林畅松. 沉积盆地的层序和沉积充填结构及过程响应[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 849-862.  
Lin Changsong. Sequence and depositional architecture of sedimentary basin and process responses[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 849-862(in Chinese with English abstract).
- [7] 王青春, 鲍志东, 贺萍. 辽河拗陷西部凹陷北区湖盆深陷期层序地层响应[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 11-20.  
Wang Qingchun, Bao Zhidong, He Ping. Sequence stratigraphic responses to the lacustrine basin deep-faulted period in the north area of the western sag, Liaohe Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(1): 11-20(in Chinese with English abstract).
- [8] 王青春, 贺萍, 鲍志东. 辽河拗陷西部凹陷高升以北地区湖盆深陷期沉积特征[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1629-1638.  
Wang Qingchun, He Ping, Bao Zhidong. Sedimentary characteristics of the deep fault depression period of the lacustrine basin in northern Gaosheng, western Liaohe depression[J]. Geology in China, 2010, 37(6): 1629-1638(in Chinese with English abstract).
- [9] 王青春, 贺萍. 辽河西部凹陷北区湖盆深陷期沉积储层响应[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2014, 36(1): 1-5.  
Wang Qingchun, He Ping. The response of sedimentation and reservoir in deep-faulted period of lacustrine basin in the north of western sag of Liaohe area[J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jianghan Petroleum Institute), 2014, 36(1): 1-5(in Chinese with English abstract).
- [10] 王青春, 贺萍. 过程响应理论及其在盆地沉积学研究中的应用——以辽河拗陷西部凹陷高升以北地区湖盆深陷期为例[J]. 内蒙古石油化工, 2014, (17): 1-3.  
Wang Qingchun, He Ping. Process-response theory and its application in the research of basin sedimentology——Take the deep-faulted period of the lacustrine basin in northern Gaosheng, western Liaohe depression, as an example[J]. Inner Mongolia

- Petrochemical Industry, 2014, (17): 1-3(in Chinese with English abstract).
- [11] 曹来圣, 喻林, 英紫娟, 等. 辽西凹陷沙四段湖相碳酸盐岩沉积模式及储层预测效果[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6): 733-738.
- Cao Laisheng, Yu Lin, Ying Zijuan, et al. Sedimentary pattern and reservoir prediction effects for lacustrine carbonate in the fourth of Shahejie Formation, Liaoxi Depression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(6): 733-738(in Chinese with English abstract).
- [12] 葛肖虹, 刘俊来, 任收麦, 等. 中国东部中—新生代大陆构造的形成与演化[J]. 中国地质, 2014, 41(1): 19-38.
- Ge Xiaohong, Liu Junlai, Ren Shoumai, et al. The formation and evolution of the Mesozoic-Cenozoic continental tectonics in eastern China [J]. Geology in China, 2014, 41(1): 19-38(in Chinese with English abstract).
- [13] 辽河油田石油地质志编辑委员会. 中国地质志(卷三)——辽河油田[M]. 北京:石油工业出版社, 1993.
- Petroleum Geology Editorial Committee of Liaohe Oilfield. Geology Annals of China(Vol. three) ——Liaohe Oilfield [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993(in Chinese).
- [14] 李应暹. 辽河裂谷渐新世初期的扇三角洲[J]. 石油勘探与开发, 1982, (4): 17-23.
- Li Yingxian. Early Oligocene fan-deltas in Liaohe rift[J]. Petroleum Exploration and Development, 1982, (4): 17-23(in Chinese with English abstract).
- [15] 孙洪斌, 张凤莲. 辽河断陷西部凹陷古近系砂岩储层[J]. 古地理学报, 2002, 4(3): 83-92.
- Sun Hongbin, Zhang Fenglian. Sandstone reservoirs characteristics of the Paleogene in western depression of Liaohe rift[J]. Journal of palaeogeography, 2002, 4(3):83-92(in Chinese with English abstract).
- [16] 金万莲, 薛叔浩, 邱云贞, 等. 辽河盆地西部凹陷沙河街组三段浊积岩及其含油性[J]. 石油学报, 1981, 2(4): 23-30.
- Jin Wanlian, Xue Shuhao, Qiu Yunzhen, et al. Turbidities in the 3<sup>rd</sup> member of Shahejie formation of the depression in the western part of Liaohe basin[J]. Acta Petroli Sinica, 1981, 2(4): 23-30 (in Chinese with English abstract).
- [17] 阎火. 辽河裂谷西部凹陷下第三系沙河街组三段浊积岩相及其分布[J]. 石油勘探与开发, 1983, (3): 23-30
- Yan Huo. The turbidite facies and its distribution in S<sub>3</sub> formation of Eogene in western depression of Liaohe rift. [J]. Petroleum Exploration and Development, 1983, (3): 23-30(in Chinese with English abstract).
- [18] 辽河石油勘探局勘探开发研究院油田室. 牛心坨洼陷沙四段沉积成岩特征及储层评价[R]. 辽河油田勘探开发研究院内部资料, 1991.
- Oil Field Research office of Exploration and Development research Institute of Liaohe Petroleum Exploration Bureau. The Sedimentary Characteristics and the Reservoir Evaluation of Niuxintuo sag[R]. Internal data of exploration and development research Institute, Liaohe Oilfield, 1991.
- [19] 牟传龙, 葛祥英, 周恳恳, 等. 川西南晚奥陶世五峰期岩相古地理[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 192-198.
- Mou Chuanlong, Ge Xiangying, Zhou Kenken, et al. Lithofacies palaeogeography in Late Ordovician Wufeng age in southwestern Sichuan[J]. Geology in China, 2015, 42(1): 192-198(in Chinese with English abstract).