

陆相断陷湖盆高频层序特征及其沉积演化 ——以渤海湾盆地济阳坳陷沙三下亚段为例

彭丽^{1,2}, 伍轶鸣¹, 练章贵¹, 彭鹏¹, 王剑³, 苏洲¹, 易珍丽¹

[1. 中国石油塔里木油田分公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000;

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430074; 3. 中国石油集团海洋工程有限公司, 北京 100028]

摘要:岩相及其组合有规律地分布于层序地层格架内。通过岩心观察和样品测试数据综合分析,基于T(湖进)-R(湖退)层序划分方法,系统分析了渤海湾盆地济阳坳陷古近系沙三下亚段陆相断陷湖盆关键层序界面特征、变化形式、构成样式及分布模式,总结出沙三下亚段的沉积层序演化模式。研究结果表明:①沙三下亚段关键层序界面类型主要有区域性的最大湖泛面和层序界面;②层序变化形式主要有向上变浅的R半旋回、向上变深的T半旋回和稳定旋回3种,层序单元构成可归为3种类型,分别为快升慢降型、慢升快降型和均一型;③沙三下亚段为一完整的三级层序,可划分为4个四级层序,对应早期湖进体系域(早期LTST)、晚期湖进体系域(晚期LTST)、早期湖退体系域(早期LRST)和晚期湖退体系域(晚期LRST),四级层序和划分的五级层序单元具有全区的可对比性和完整性;④济阳坳陷沙三下亚段湖平面在总体快升慢降的背景下,主要经历4个变化阶段——早期LTST的快速上升阶段、晚期LTST的缓慢上升阶段、早期LRST的缓慢下降阶段及晚期LRST的下降阶段。层序演化过程中,构造沉降、沉积物供给和气候条件等因素在不同阶段所起的作用不同,从而造成层序格架内岩相及其组合分布的差异。

关键词:高频层序;T-R层序;岩相;陆相断陷湖盆;沙三下亚段;济阳坳陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Features and sedimentary evolution of high-frequency sequence in continental lacustrine rift basin: Example of the lower Shahejie member 3 in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

Peng Li^{1,2}, Wu Yiming¹, Lian Zhanggui¹, Peng Peng¹, Wang Jian³, Su Zhou¹, Yi Zhenli¹

[1. Research Institute of Exploration and Development, Tarim Oil field Branch Company of CNPC, Korla Xinjiang 841000, China;

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

3. CNPC Offshore Engineering Company Ltd., Beijing 100028, China]

Abstract: Lithofacies along with its assemblages is distributed regularly within the sequence stratigraphic framework. Based on T(transgression)-R(regression) sequence division features, variations, architectures and distribution patterns of the key sequential interfaces have been analyzed systematically in fault continental lacustrine basin in the lower part of the third member of the Paleogene Shahejie Formation(E_s^{3L}) in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, by core observation and sample test data. And the evolution pattern of sedimentary sequences in E_s^{3L} has been summarized furtherly. The results show that ① the major types of key sequential interfaces in E_s^{3L} are the regional maximum flooding surface(MFS) and sequence interface. ② Three variations of sequences are identified, namely the shallowing-upward R-shaped semi-cycle, deepening-upward T-shaped semi-cycle and stable cycle. While the sequence units can be reduced to three types, namely the type characterized by fast rise but slow drop, the type characterized by slow rise but fast drop, and the type characterized by constant variation. ③ As an integrated third-order sequence, the E_s^{3L} can be sub-divided into four forth-order sequences, that is, the early lacustrine transgressive system tract(early LTST), late lacustrine transgressive

收稿日期:2017-12-25;修订日期:2019-01-16。

第一作者简介:彭丽(1986—),女,博士后,层序地层和储层沉积学。E-mail:474545488@qq.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239102);中国石油重大科技专项(2212IG20112001)。

system tract(late LTST),early lacustrine regressive system tract(early LRST) and late lacustrine regressive system tract(late LRST). These forth-order sequences together with the sub-divided fifth-order sequence units feature comparability and integrity. ④ The lake level of the E_s^{3L} in Jiyang Depression generally fluctuates in a fast-rise-but-slow-fall pattern, and the fluctuation can be classified into four stages:the fast-rise stage during the early LTST,the slow-rise stage during the late LTST,the slow-fall stage during the early LRST,and the fall stage during the late LRST. In the process of sequence evolution,factors,such as tectonic subsidence,sediment supply and climate conditions,play specific roles in different stages,resulting in differential distribution of lithofacies and their assemblages within the sequence stratigraphic framework.

Key words: high-frequency sequence, T-R sequence, lithofacies, continental fault lacustrine basin, E_s^{3L} , Jiyang Depression, Bohai Bay Basin

T-R 层序代表一个沉积基准面升降过程中可容纳空间连续变化所形成的一套地层,即从一次水体加深事件至下一次同等级水体加深事件产生的产物^[1-2]。该理论对于分析湖平面变化频繁、气候变迁和构造特征复杂的陆相断陷湖盆针对性强,国内学者在该理论引入国内后进行过多次勘探应用研究,实际效果显著^[3-5]。

济阳坳陷地理位置上位于渤海湾盆地东南部,属于渤海湾盆地内的一个次级构造单元,其从古近系孔店组早期开始进入断陷阶段,共发育了沙河街组四段上亚段、沙三下亚段和沙一段3套湖相泥页岩。其中,沙三下亚段获得工业油气流井数最多,分布最广,是济阳坳陷页岩油主要勘探目的层段^[6]。前人对沙三下亚段已做过大量研究^[6-10],但受资料及方法等限制,尚未开展系统的层序地层学研究,在层序特别是高频层序构成样式、层序分布模式及沉积演化规律等方面的认识比较欠缺,有效泥页岩的分布规律尚不清楚。因此,建立高频等时地层格架、进行岩相空间分布规律预测,对于指导下一步该区页岩油藏的勘探、评价与开发均具有重要意义。

本文基于湖进(T)-湖退(R)层序划分方法,以济阳坳陷古近系沙三下亚段陆相断陷湖盆为例,通过准确识别层序关键界面和变化形式,系统分析层序构成样式,明确层序内部岩相的变化规律,在此基础上建立可对比的层序地层格架,在层序格架内分析沙三下亚段的沉积演化规律。

1 实验数据与岩相划分

沙三下亚段测试样品取自济阳坳陷页岩油重点探井罗69井、樊页1井和利页1井,3口井在沙三下亚段累计取心长512 m,其中位于沾化凹陷渤南洼陷的罗69井针对沙三下亚段整个三级层序连续取心

197 m,位于东营凹陷博兴洼陷的樊页1井也揭示了完整的沙三下亚段页岩层系,连续取心200 m,利页1井位于东营凹陷利津洼陷,沙三下亚段取心长度115 m,也揭示了大部分沙三下亚段。针对沙三下亚段频繁湖进-湖退、岩相复杂的情况,密集采样,设计平均采样间距0.25 m,并对采集样品进行了镜下薄片观察、X-射线衍射全岩及有机地化参数等分析测试工作。

岩相是—定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,矿物组成是陆源输入、沉积作用及生物化学作用共同作用的结果,是造成泥页岩岩相差异的根本因素^[11-12],基于矿物组成划分的岩相具有理论基础性、普遍适用性和可对比性强的特点,因此,本文依据矿物组成对研究区沙三下亚段泥页岩岩相进行划分。在断陷鼎盛期背景下沉积的沙三下亚段富含有机质湖相泥页岩,页理较发育,在研究区广泛稳定分布,本次研究统一将这套灰色泥页岩定名为页岩。通过灰质(碳酸盐矿物)-泥质(粘土矿物)-砂质(主要为石英矿物)三端元图进行分类,将研究区的泥页岩划分出4个岩相组合(大类)和16个岩相(类)。灰质页岩相组合灰质矿物含量大于50%,泥质页岩相组合泥质矿物含量大于50%,砂质页岩相组合砂质矿物含量大于50%,而混合质页岩相组合为灰质、泥质和砂质的矿物含量均小于50%。同时进一步细分页岩岩相,按三端元含量的25%,50%和75%将泥页岩划分出16个岩相。以罗69井、樊页1井和利页1井为例,在大量X-射线衍射全岩分析的基础上,将其灰质、泥质和砂质的矿物含量形成三端元图,图中显示研究区内主要发育8类岩相:灰质页岩相、含砂灰质页岩相、混合灰质页岩相、含泥灰质页岩相、混合质页岩相、含灰/砂混合质页岩相、含泥/砂混合质页岩相、含泥/灰混合质页岩相,只有少部分样品点落在其他岩相区域(图1a)。同时,与国

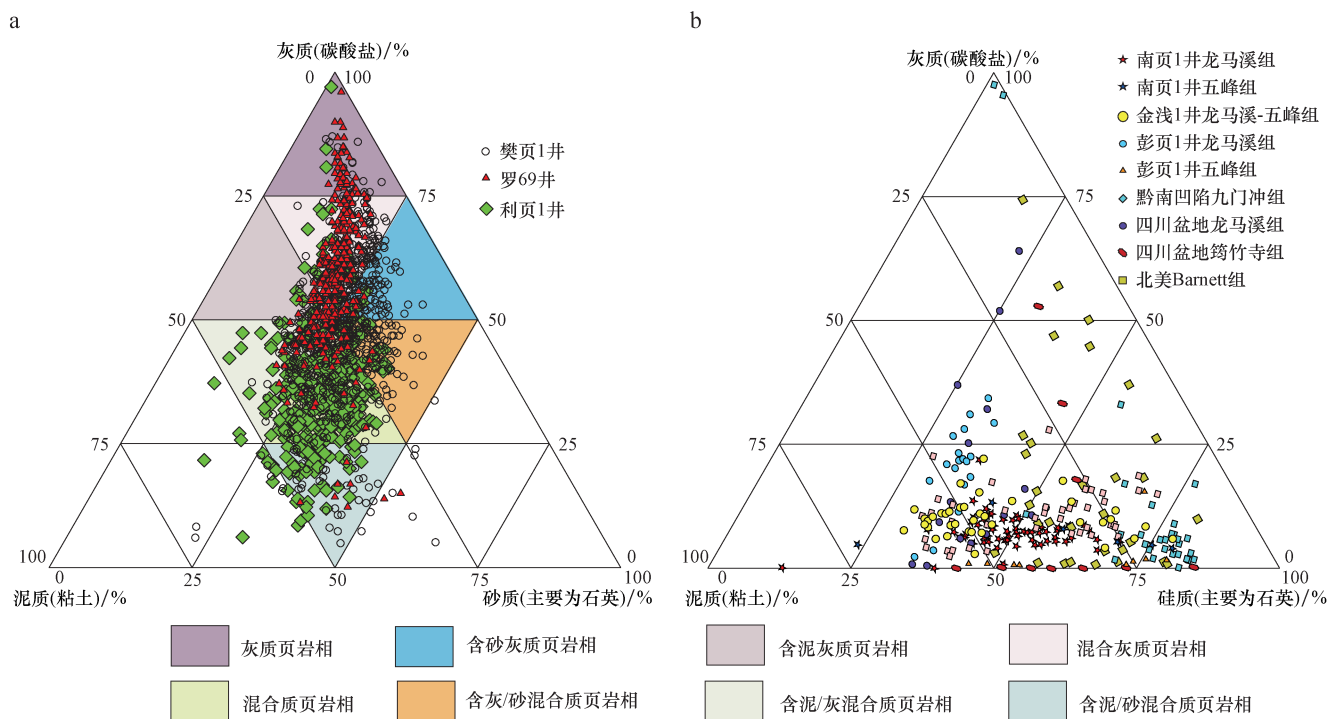


图1 泥页岩矿物组成三端元图

Fig. 1 Ternary diagram showing the mineral compositions of shales

a. 济阳坳陷沙三下亚段泥页岩矿物组成三端元图; b. 国内外海相泥页岩矿物组成三端元图

内外海相泥页岩岩相分布特征对比(图1b),研究井沙三下亚段具有灰质矿物含量较高的特点,这可能与湖盆面积小和受气候影响较大等条件有关^[13]。

2 高频层序地层研究

T-R层序产生于陆相断陷湖盆,是湖水进退过程中的产物,其产生的物理界面所限定的三级层序、四级层序和五级层序等都是相对整齐的、成因上有联系的地层单位^[14]。三级以上的高频层序,具有与三级层序同样的构成样式,也可以做类似三级层序划分对比的工作^[15]。济阳坳陷沙三下亚段是沉积在断陷鼎盛期的一套湖相泥页岩,其三级层序由下部的湖进体系域(LTST)及上部的湖退体系域(LRST)两个部分组成,五级层序内部也可以做类似的划分,并以此为依据识别划分层序。

2.1 基于多标志的关键层序界面识别

由于泥页岩的岩性变化、垂向粒度等不如粗粒碎屑岩明显,使得其各级次层序界面识别比较困难,尤其是在地层单位较小的五级层序,高频湖平面升降变化幅度较小,层序识别与研究少有人涉及。吴靖等指出在湖相沉积环境中,不能依据单一特征

来研究细粒岩的层序问题^[16]。测井曲线Th(钍含量)和GR(自然伽马)、粘土矿物和碳酸盐岩矿物含量、有机碳含量(TOC)对湖平面变化的反应十分敏感,可以作为湖相泥页岩高频层序关键界面的识别依据^[15-18]。

2.1.1 区域性最大湖泛面

在湖相环境中,主要为深灰色和灰色泥页岩沉积,部分层段从灰质页岩转向含泥灰质页岩,具有沉积动力和沉积速率较低的特征,此时发育区域性的最大湖泛面,水体最深。在实际操作过程中,认为曲线Th和GR、粘土矿物最大值往往反映的是每期层序水体最深处,而水体最深又往往是各类生物较富集,TOC也比较高的时期,但碳酸盐岩矿物含量出现较小值,此界面即为区域性的最大湖泛面。

2.1.2 层序界面

层序界面代表浅水相对高能环境,特定的沉积环境决定特定的岩性组合^[19]。初始湖泛期陆源碎屑物质供给不充分条件下形成的碳酸盐层或快速湖平面上升阶段形成的砂质条带等都可以辅助识别层序界面。与区域性的最大湖泛面识别相反,认为曲线Th和GR、粘土矿物最小值反映的是每期层序界面,该时期水体

较浅,生物发育较少,TOC 值较低,而碳酸盐岩矿物含量出现最大值,此界面即为层序界面。

2.2 层序构成样式

2.2.1 3 种变化形式

通过研究发现,泥页岩层序在空间上表现为 3 种变化形式,即 R 半旋回、T 半旋回和稳定旋回,3 种形式被解释为代表着 2 个连续的相对湖平面变化事件,即湖进事件和湖退事件^[19]。湖进事件代表的是湖盆扩张,湖平面上升,沉积速率小于可容纳空间增加速率,在此阶段沉积一套以细粒沉积物为主的地层,即形成了 T-R 层序的 T 旋回,当湖水上涨到最大位置后,湖平面也将保持稳定高度,这一过程的层序地层学意义是水体稳定过程,当稳定状态被打破后,接下来就是湖退事件,湖平面相对下降,湖泊开始收缩,沉积速率大于可容纳空间增加速率,从而构成了 T-R 层序的 R 旋回。以沉积环境变化过程中最本质的反映,即岩相及其组合为主,同时借助测井曲线、矿物成分以及地球化学特征,分析各指标之间的数值关系,从而进行泥页岩层序 3 种变化形式的识别。每一变化形式 GR 数值从小到或大到小变化,粘土矿物、碳酸盐岩矿物和 TOC 值都有着相应增加或减少的反应,对应的岩相及其组合特征的变化趋势也有所差异。

1) 向上变浅的 R 半旋回

反映的是水退过程,GR 曲线向上递减,同时从下往上粘土矿物和 TOC 值逐渐减少,碳酸盐岩矿物含量逐渐增加,反映到湖相沉积环境下对应着相对湖平面下降的过程-湖退事件,即 GR 曲线的向上递减指示了湖泊退积,湖水体变浅,深水环境的高有机质含泥/灰混合质页岩相向上被浅水低有机质含砂灰质页岩相取代(图 2a)。

2) 向上变深的 T 半旋回

反映的是水进过程,GR 曲线向上递增,同时从下往上粘土矿物和 TOC 值逐渐增加,碳酸盐岩矿物含量逐渐减少,反映到湖相沉积环境下对应着相对湖平面的上升过程-湖进事件,即 GR 曲线的向上递增指示了湖泊进积,湖泊水体加深,浅水环境的低有机质灰质页岩相被深水环境的高有机质含泥/灰混合质页岩相取代(图 2b)。

3) 稳定旋回

反映的是稳定过程,GR 曲线值向上基本稳定,同时从下往上粘土矿物和 TOC 值基本上处在一个稳定的范围,而碳酸盐岩矿物含量也保持稳定的状态,岩相从含砂灰质页岩相变化到含泥灰质页岩相再到

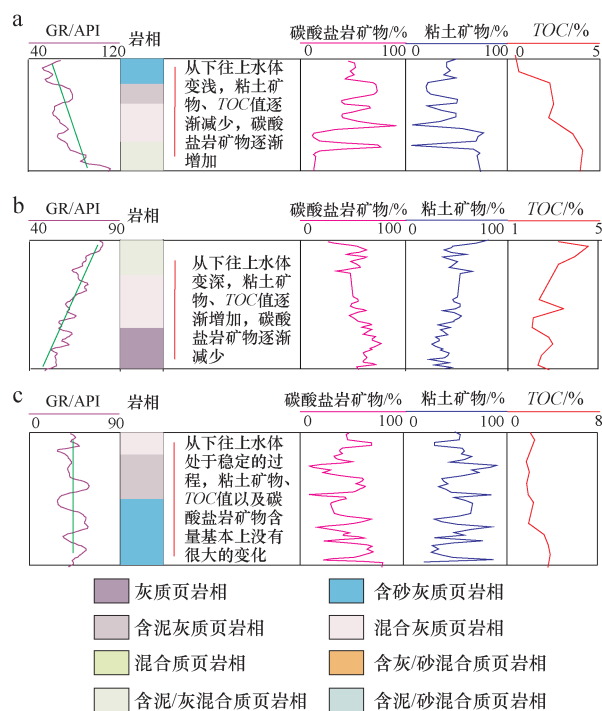


图 2 济阳坳陷沙三下亚段 3 种层序变化形式

Fig. 2 Three variations of sequences in the Es^{3L} of

Jiyang Depression

a. 向上变浅的 R 半旋回; b. 向上变深的 T 半旋回; c. 稳定旋回

混合灰质页岩相,岩相组合基本处在灰质页岩相,整体变化不大,反映到湖相沉积环境下对应着湖退事件和湖进事件之间的水体稳定期,湖水上涨到最大位置阶段(图 2c)。

2.2.2 构成样式

一个完整层序的形成是与湖平面相对升降变化密切相关的,每个层序内部都包含着一个湖进和一个湖退,总体上具有从下向上水深变浅的过程^[14,20]。当相对湖平面上升或水深增大时发生湖进,这时富碳酸盐岩矿物,纹层状构造(纹层厚度小于 1 mm)或层状构造(纹层厚度大于等于 1 mm)发育;紧接着当相对湖平面下降或湖水变浅时发生湖退,这时相对富粘土矿物,块状构造(纹层不发育)发育。湖泊升降有快有慢,其可以理解为相对湖平面变化的速率,往往决定了沉积物的矿物组成和沉积构造。如 Schutter 认为海侵体系域中相对海平面上升速度影响泥页岩发育情况,当相对海平面上升速率较慢时,沉积连续、厚层的泥页岩地层;当相对海平面快速上升时,发育连续性较差、薄层的泥页岩沉积地层^[21]。胡源等在研究滨里海盆地碳酸盐岩准层序特征时发现,其具有快速海进和慢速海进的特点,两种情况下研究区发育不同模式,主要表现为海平面上升速度对碳酸盐岩生长的影响,其对

生物礁等储层发育也有控制作用,在海平面快速上升过程中,还可以形成淹没不整合面^[15]。

湖泊升降快慢结合高频变化形式可以组合成4种相对湖平面变化过程,分别为快速上升、缓慢上升、缓慢下降和快速下降,并将一个完整的层序构成样式归为3类可以进行对比的类型,叫做快升慢降型、慢升快降型和均一型。下面通过岩性、岩相、薄片照片以及测井曲线Th的变化,说明3类层序构成样式的变化特征。

1) 快升慢降型

简称为A型,意味着湖平面上升速率小于湖平面下降速率,R半旋回厚度大于T半旋回。在这个过程中,碳酸盐岩矿物含量减少,层理从页状或纹层状发育变化到块状,该类型五级层序主要位于沙三下亚段底部或中上部。如罗69井Ps2,此五级层序位于沙三下亚段底部,Th曲线自下向上先减小后增大,R2半旋回厚度大于T2半旋回厚度,岩相从灰质页岩相到含泥灰质页岩相,碳酸盐岩矿物含量总体上降低,通过岩心观察结合薄片鉴定,从底到顶纹层状构造逐渐减少(图3a)。

2) 慢升快降型

简称为B型,意味着湖平面上升速率大于湖平面下降速率,R半旋回厚度小于T半旋回,在这个过程中,层理依然从页状或纹层状发育变化到块状,但是很明显纹理或者层理发育段占据了该段的大部分,此类型仅出现在沙三下亚段中下部,不甚发育。如罗69井Ps6,R6半旋回厚度小于T6半旋回厚度,底部发育厚层灰质页岩相,到上渐变为含泥灰质页岩相,纹层状构造发育,仅在顶部发育少量块状构造(图3b)。

3) 均衡型

简称为C型,意味着湖平面上升速率接近湖平面下降速率,R半旋回厚度近似等于T半旋回,在这个过程中,层理构造依然会从层状或纹层状发育变化到块状,但是变化特征没有前两种构成样式明显,此类型除出现在沙三下亚段下部,绝大部分层段均发育。如罗69井Ps21,R6半旋回厚度近似等于T6半旋回厚度,岩相类型发育较多,从底向上有混合质页岩相、混合灰质页岩相、含灰/砂混合质页岩相和含泥/砂混合质页岩相,碳酸盐岩矿物含量向上总体上呈降低的趋势,层理构造自下向上从层状到块状(图3c)。

2.3 沙三下亚段高频层序构成样式分布模式

2.3.1 泥页岩段层序划分

济阳坳陷沙三下亚段沉积于断陷鼎盛期的深湖环境,为一完整的三级层序,反映了一次完整的区域性

湖平面升降^[22-23]。根据前面所述层序关键界面的识别、3种变化形式(R半旋回、T半旋回和稳定旋回)和3种构成样式(快升慢降型、慢升快降型和均一型)的层序地层学意义,并结合以岩相及其组合为主,测井曲线Th和GR、碳酸盐岩矿物含量、粘土矿物含量和TOC为辅等资料的综合分析,将罗69井沙三下亚段划分为4个四级层序(自下而上为Pss1, Pss2, Pss3和Pss4),两个体系域(湖进体系域LTST和湖退体系域LRST),体系域又可进一步细分,为早期LTST,晚期LTST,早期LRST和晚期LRST,22个五级层序(自下而上为Ps1, Ps2, ..., Ps22),平均每个五级层序厚9m,与五级层序沉积厚度一般几米到几十米是吻合的(图4)。

2.3.2 不同构成样式分布模式

沙三下亚段一口井上层序划分方案一经确定,便可以依据这口井测井曲线所体现的各级层序的成因意义和等时性等特征,与其他井各级层序一一比对,从而搭建横向上四—五级层序的沉积旋回对比格架(图5)。

从图5中看到,每口井沙三下亚段层序内都发育LTST和LRST两个体系域,其中LRST旋回厚度大于LTST,层序内部具有A型构成样式的特点,湖平面整体快升慢降。四级层序单元和五级层序单元具有可对比性和完整性,五级层序构成样式都经历了从早期LTST的A型(快升慢降),到晚期LTST的B+C型(慢升快降混合均衡升降),到早期LRST的A+C型(快升慢降混合均衡升降),再到晚期LRST的C型(均衡升降),表明区域地层湖平面升降具有同步性,只是不同井五级层序发育个数存在差异,这可能与井所在位置当时湖泊水体的深浅有关。同时可以看到,密集段附近的五级层序旋回厚度较薄,这是因为密集段意味着相对湖平面上升到最大高度,沉积速率较低,水体为保持相对稳定振荡较频繁。

3 沙三下亚段沉积层序演化

对于陆相断陷湖盆中的层序成因,郭建华等提出三级层序是由于区内断层的幕式活动所致,更高频的则与米兰科维奇旋回相关^[24];操应长等人指出,气候潮湿背景条件下,沉积物充填和幕式构造运动都对陆相断陷湖盆层序的形成起到决定作用^[5]。对济阳坳陷沙三下亚段断陷湖盆层序演化研究认为,层序的形成是由于构造沉降、沉积物供给和气候条件等

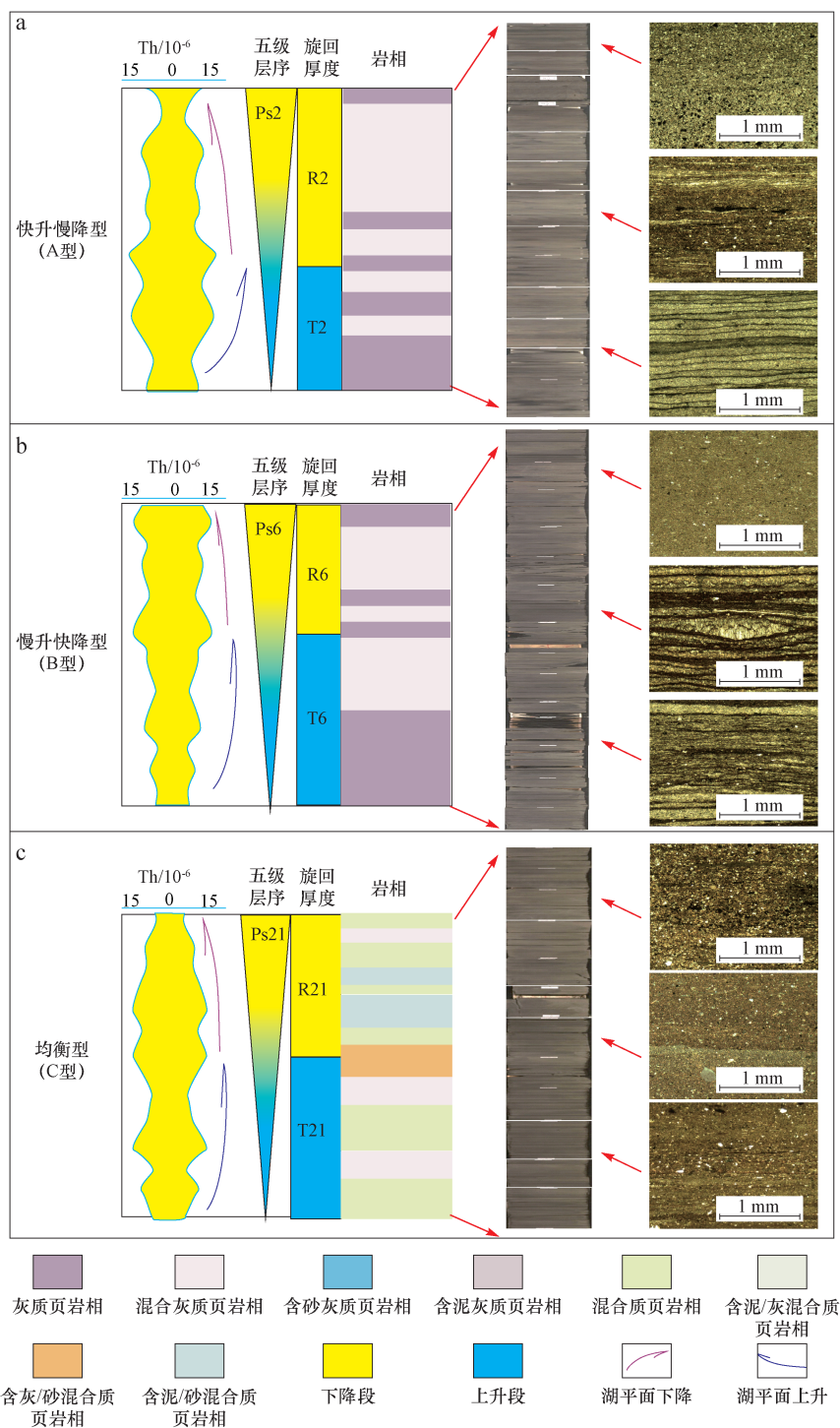


图3 济阳坳陷沙三下亚段高频层序构成样式(罗69井)

Fig. 3 Architectures of high-frequency sequences in the Es^{3L} of Jiyang Depression (Well L69)

因素在层序形成的不同时期所起作用的不同造成的。沙三下亚段湖平面在总体快升慢降的背景下,主要经历4个变化阶段:早期LTST的快速上升阶段、晚期LTST的缓慢上升阶段、早期LRST的缓慢下降阶段及晚期LRST的下降阶段。层序地层演化阶段对泥页岩沉积起着极其重要的控制作用,地层岩相组合有规律地分布于层序地层格架中的特定阶段

或部位(图6)。

早期LTST沉积时期,此时源于沙四段末期的控盆断裂的活动强度降低,在气候相对温暖潮湿条件下,河流携带大量陆源碎屑流入湖盆,相对湖平面上升。该体系域由多个快升慢降型五级层序垂向叠加而成,形成了湖平面快速上升阶段。底部水体较浅,陆源碎屑供给较少,水体受水动力影响较小,纹层状构造发育,

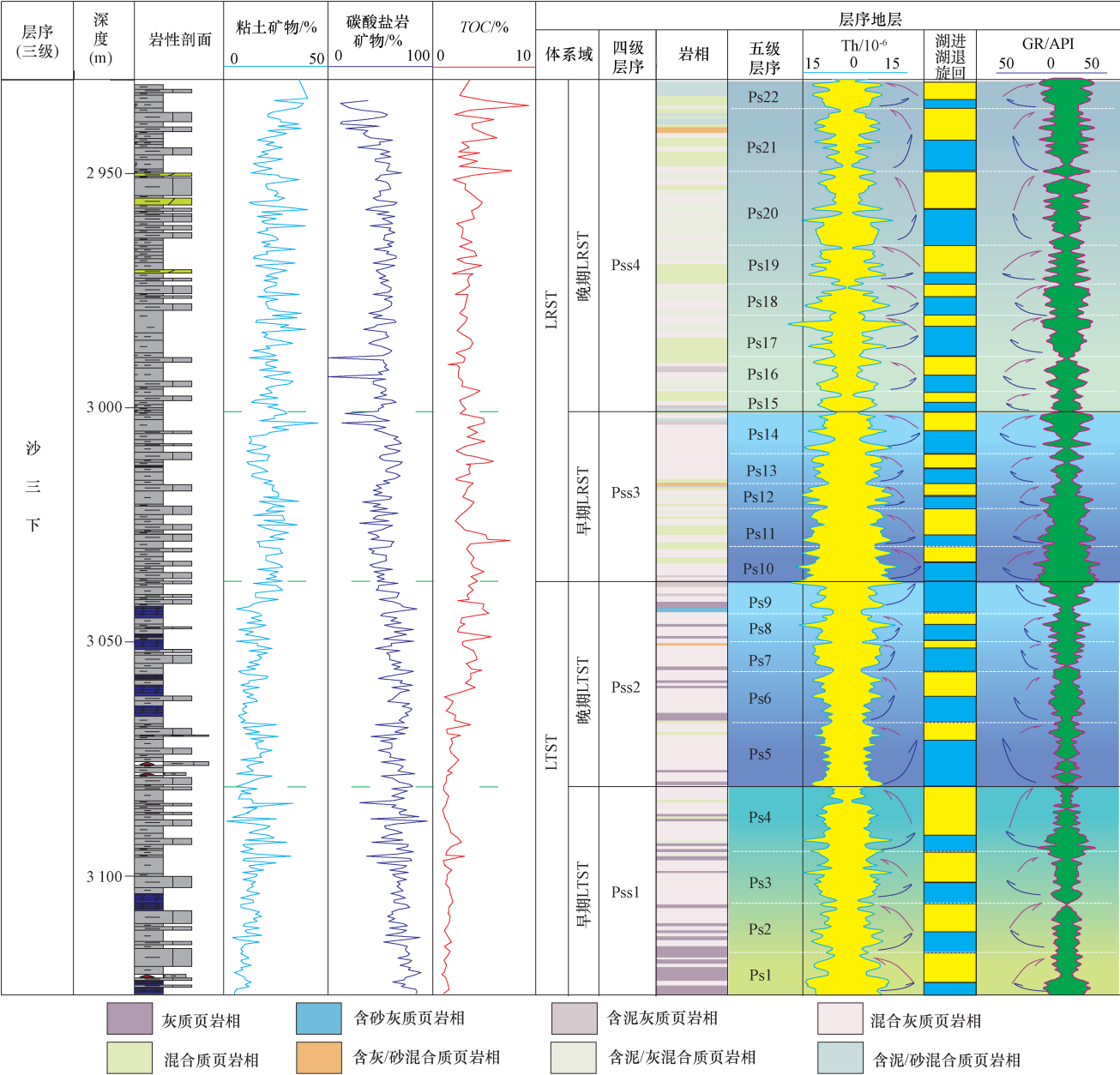


图 4 济阳坳陷罗 69 井沙三下亚段层序划分

Fig. 4 Sequence division of the Es^{3L} in Well L69, Jiyang Depression

单井岩心表现为厚层灰质页岩相沉积。随着陆源碎屑供给的增多,碳酸盐岩矿物比例降低,岩相逐渐转变为含泥灰质页岩相沉积。该时期处于半闭流阶段,灰质矿物含量较高,纹层状构造发育,泥页岩颜色相对较浅,表明气候相对于干旱、水体盐度较高。

晚期 LTST 沉积时期,随着构造活动的减弱或停止,以及稳定充足的外界水流背景条件下,湖盆进入频繁振荡缓慢上升阶段。该体系域由多个慢升快降型或均衡型五级层序垂向叠加而成,形成了湖平面缓慢上升,其顶部为最大湖泛面。该时期水生生物开始受陆源碎屑注入的影响,河流携带大量的陆源营养物质,形

成有利于水生生物生存的环境,岩心中也发现较多的微古生物化石和藻类,为有机质富集提供物质来源,同时湖泊频繁的振荡也有效地保存了有机质,所以在该时期泥页岩 TOC 值明显增加(图 4)。岩相以混合灰质页岩相为主,由于略显动荡的水体环境,纹层状构造略微有所减少,并且纹层间界线不清晰。

早期 LRST 沉积时期,该时期沉积物供给成为主导因素,大量水体流入湖盆,当达到最大湖泛面之后,湖盆可容空间开始减小,相对湖平面频繁振荡并缓慢下降。该体系域由多个快升慢降型或均衡型五级层序垂向叠加而成,形成了湖平面缓慢下降,其底界面为最

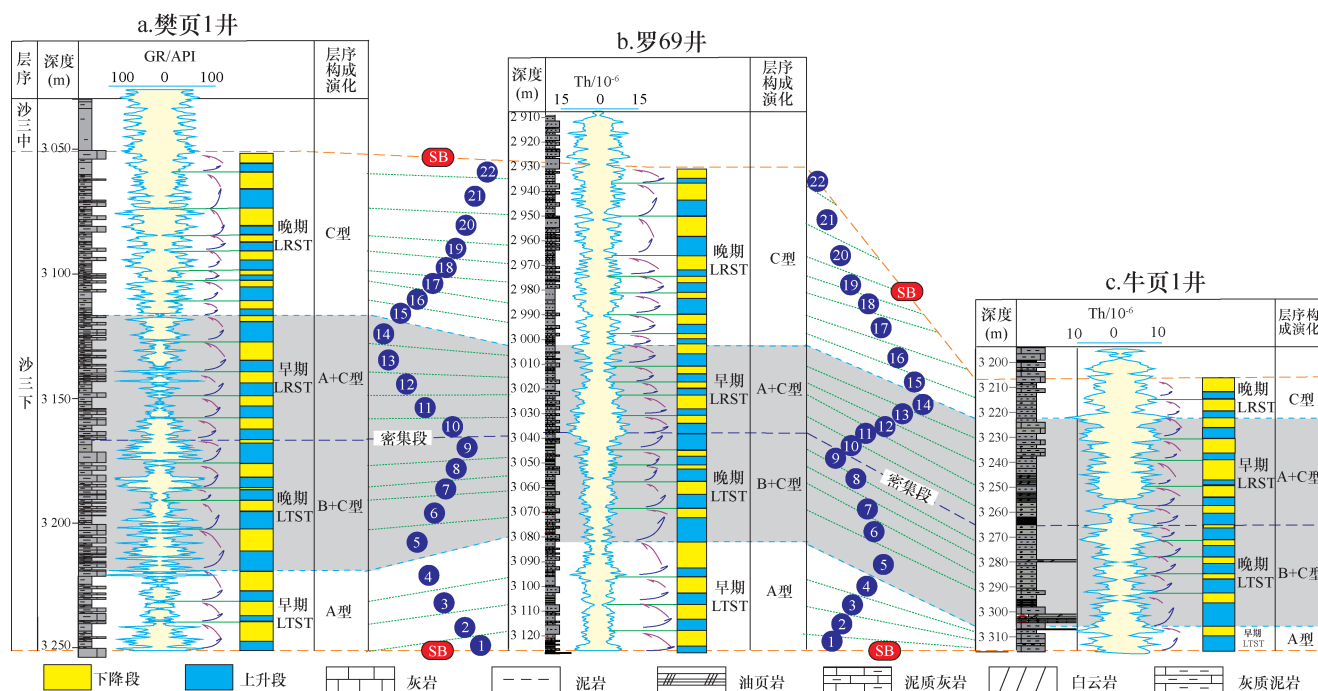


图5 济阳坳陷沙三下亚段四-五级层序对比

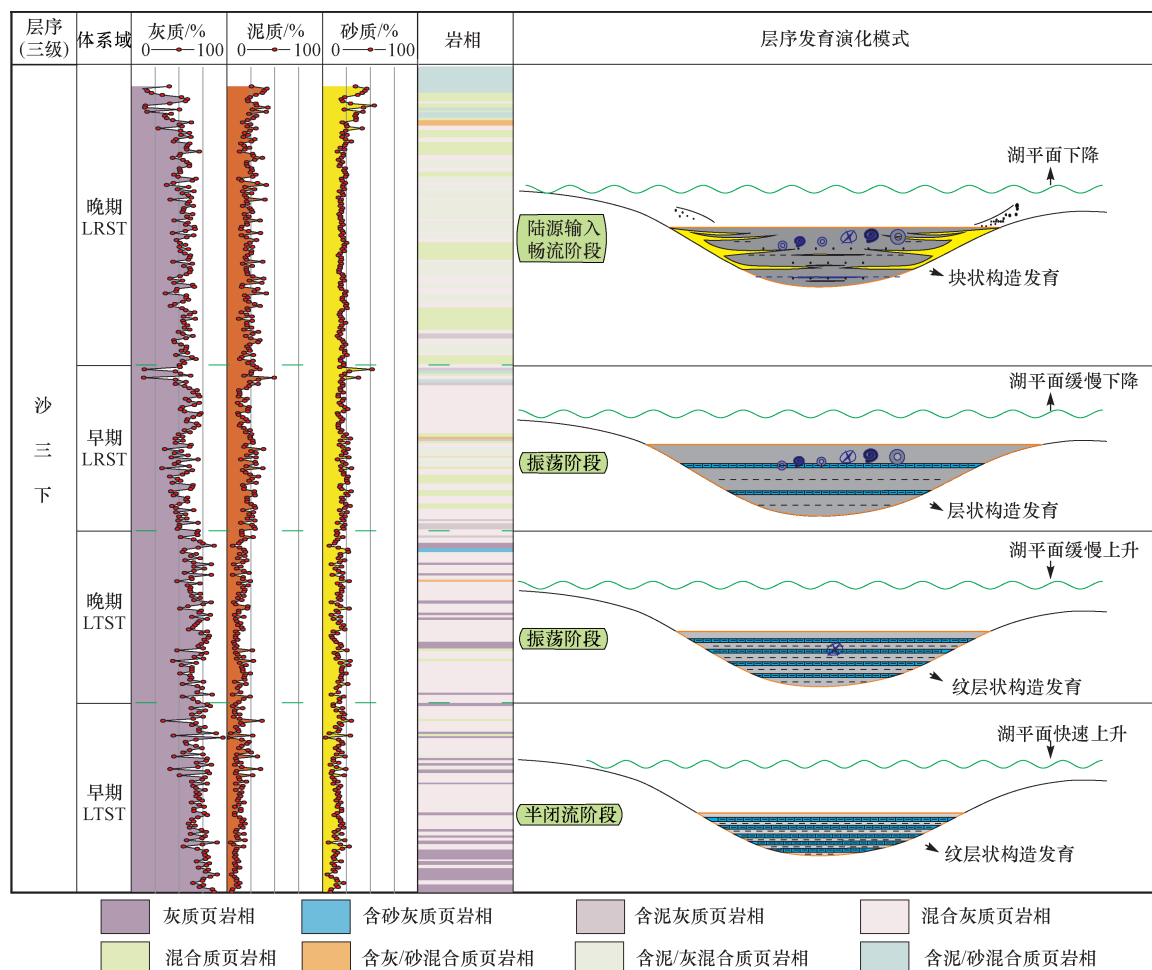
Fig. 5 Correlation of the fourth-order and fifth-order sequences in the Es^{3L} of Jiyang Depression

图6 济阳坳陷沙三下亚段层序发育演化模式

Fig. 6 Sequence evolutionary patterns of the Es^{3L} of Jiyang Depression

大湖泛面。随着陆源碎屑的持续注入,水动力较晚期湖进体系域明显加强,构造类型以层状为主,水体环境达到最适合水生生物生存的状态,在岩心中可见到比晚期湖进体系域种类和数量更多的微古生物。岩相以混合灰质页岩相和含泥/灰混合质页岩相为主,泥页岩颜色有明显加深。

晚期 LRST 沉积时期,沉积物持续供给,相对湖平面继续下降。该体系域由多个均衡型五级层序垂向叠加而成,形成了湖平面下降阶段。该时期气候条件更显温暖潮湿,外界水体带来的陆源碎屑输入量也达到最大,进入陆源输入畅流阶段,水体较动荡,以发育块状构造为主,岩相种类较多,混合灰质页岩相、混合质页岩相和含泥/砂混合质页岩相都有发育,并且由底到顶有灰质矿物含量较少,泥质和砂质矿物含量增加的趋势。

4 结论

1) 济阳坳陷沙三下亚段关键层序界面类型主要有区域性的最大湖泛面和层序界面,其可以通过岩性组合分析,并结合 Th 和 GR、粘土矿物和碳酸盐岩矿物含量、TOC 含量综合分析识别。

2) 济阳坳陷沙三下亚段泥页岩主要有向上变浅的 R 半旋回、向上变深的 T 半旋回和稳定旋回 3 种五级层序变化形式,层序单元构成可归为 3 种类型,分别为快升慢降型、慢升快降型和均一型。

3) 济阳坳陷沙三下亚段划分为 4 个四级层序,对应早期 LTST、晚期 LTST、早期 LRST 和晚期 LRST 总共 4 个体系域,四级层序和划分的五级层序单元具有全区的可对比性和完整性,五级层序构成样式都经历了从早期 LTST 的快升慢降,到晚期 LTST 的慢升快降混合均衡升降,到早期 LRST 的快升慢降混合均衡升降,再到晚期 LRST 的均衡升降。

4) 济阳坳陷沙三下亚段湖平面在总体快升慢降的背景下,主要经历 4 个变化阶段:早期 LTST 的快速上升阶段、晚期 LTST 的缓慢上升阶段、早期 LRST 的缓慢下降阶段及晚期 LRST 的下降阶段,同时泥页岩岩相在层序格架内纵向分布的具体位置有些差别。

参 考 文 献

- [1] Johnson J G, Klapper G, Sandberg C A. Devonian eustatic fluctuations in Euramerica [J]. Geological Society of America Bulletin, 1985, 96(5): 567-587.
- [2] 张晨晨, 张顺, 魏巍, 等. 松辽盆地嫩江组 T-R 旋回控制下的层序结构与沉积响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(12): 2618-2636.
- [3] Zhang Chenchen, Zhang Shun, Wei Wei, et al. Sedimentary filling and sequence structure dominated by T-R cycles of the Nenjiang Formation in the Songliao Basin [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44(12): 2618-2636.
- [3] 郭建华, 朱美衡, 刘辰生, 等. 陆相断陷盆地湖平面变化曲线与层序地层学框架模式讨论[J]. 矿物岩石, 2005, 25(2): 87-92.
- Guo Jianhua, Zhu Meiheng, Liu Chensheng, et al. The curve of lacustrine level change in continental rift-subsidence basin and the sequence stratigraphy framework model [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2005, 25(2): 87-92.
- [4] 李海华. 南襄盆地泌阳凹陷层序地层学与隐蔽油气藏研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(1): 47-51.
- Li Haihua. Study of sequence stratigraphy and subtle reservoirs in the Biyang sag of the Nanxiang basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(1): 47-51.
- [5] 操应长, 姜在兴, 夏斌, 等. 陆相断陷湖盆 T-R 层序的特点及其控制因素——以东营凹陷古近系沙河街组三段层序地层为例[J]. 地质科学, 2004, 39(1): 111-122.
- Cao Yingchang, Jiang Zaixing, Xia Bin, et al. Characters and controlling factors of T-R Sequence in lacustrine deposits of rift basin: an example from the Dongying depression, Eastern China [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 111-122.
- [6] 宋国奇, 徐兴友, 李政, 等. 济阳坳陷古近系陆相页岩油产量的影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 463-471.
- Song Guoqi, Xu Xingyou, Li Zheng, et al. Factors controlling oil production from Paleogene shale in Jiyang depression [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 463-471.
- [7] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031-1039.
- Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(6): 1031-1039.
- [8] 李政, 王秀红, 朱日房, 等. 济阳坳陷沙三下亚段和沙四上亚段页岩油地球化学评价[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(5): 510-514.
- Li Zheng, Wang Xiuhong, Zhu Rifang, et al. Geochemical evaluation of shale oil in lower Es3 and Upper Es4 in Jiyang Depression [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(5): 510-514.
- [9] 王永诗, 李政, 巩建强, 等. 济阳坳陷页岩油气评价方法——以沾化凹陷罗家地区为例[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 83-91.
- Wang Yongshi, Li Zheng, Gong Jianqiang, et al. Discussion on an evaluation method of shale oil and gas in Jiyang depression: a case study on Luoia area in Zhanhua sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 83-91.
- [10] 张善文, 张林晔, 李政, 等. 济阳坳陷古近系页岩油气形成条件[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 1-5.
- Zhang Shanwen, Zhang Linye, Li Zheng, et al. Formation conditions of Paleogene shale oil and gas in Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 1-5.
- [11] 郝运轻, 谢忠怀, 周自立, 等. 非常规油气勘探领域泥页岩综合分类命名方案探讨[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 16-19.
- Hao Yunqing, Xie Zhonghuai, Zhou Zili, et al. Discussion on multi-

- factors identification of mudstone and shale[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(6): 16–19.
- [12] 张顺, 陈世悦, 鄢继华, 等. 东营凹陷西部沙三下亚段——沙四上亚段泥页岩岩相及储层特征[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(2): 320–332.
- Zhang Shun, Chen Shiyue, Yan Jihua, et al. Characteristics of shale lithofacies and reservoir space in the 3rd and 4th members of Shahejie Formation, the west of Dongying sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(2): 320–332.
- [13] 田春桃, 马素萍, 杨燕, 等. 湖相与海相碳酸盐岩烃源岩生烃条件对比[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 336–341.
- Tian Chuntao, Ma Suping, Yang Yan, et al. Comparison of hydrocarbon generation conditions between lacustrine and marine carbonate source rocks[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(3): 336–341.
- [14] 吴靖. 东营凹陷古近系沙四上亚段细粒岩沉积特征与层序地层研究[D]. 中国地质大学(北京), 2015.
- Wu Jing. The study on sedimentary characteristics and sequence stratigraphy of fine grained rocks of the upper fourth member of Paleogene Shahejie Formation, Dongying Depression[D]. *China University of Geosciences (Beijing)*, 2015.
- [15] 胡源, 陈开远, 李玉海, 等. 滨里海盆地碳酸盐岩高频层序特征及其油气勘探应用——以 M 区块石炭系 KT—I 含油层系为例[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 608–615.
- Hu Yuan, Chen Kaiyuan, Li Yuhai, et al. Features and petroleum exploration significance of high-frequency sequence in pre-caspian basin: A case from carboniferous KT-I member in M block[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 608–615.
- [16] 吴靖, 姜在兴, 吴明昊. 细粒岩层序地层学研究方法综述[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(5): 16–20.
- Wu Jing, Jiang Zaixing, Wu Minghao. Summary of research methods about the sequence stratigraphy of the fine-grained rocks[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2015, 34(5): 32–39.
- [17] 赵俊青, 纪友亮, 张世奇, 等. 陆相高分辨率层序界面识别的地球化学方法[J]. *沉积学报*, 2004, 22(1): 79–86.
- Zhao Junqing, Ji Youliang, Zhang Shiqi, et al. Geochemical methods of boundary identification in terrigenous high-resolution sequence[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 79–86.
- [18] 刘招君, 孙平昌, 贾建亮, 等. 陆相深水环境层序识别标志及成因解释: 以松辽盆地青山口组为例[J]. *地学前缘*, 2011, 18(4): 171–180.
- Liu Zhaojun, Sun Pingchang, Jia Jianliang, et al. Distinguishing features and their genetic interpretation of stratigraphic sequences in continental deep water setting: A Case from Qingshankou Formation in Songliao Basin. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 171–180.
- [19] 杨特波, 王宏语, 刘振华, 等. 泥页岩 GRP 层序地层划分方法及应用意义[J]. *特种油气藏*, 2012, 19(6): 49–52.
- Yang Tebo, Wang Hongyu, Liu Zhenhua, et al. The GRP method of sequence stratigraphy classification for clay shale and its application significance[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2012, 19(6): 49–52.
- [20] 崔金栋, 郭建华, 李群. 准噶尔盆地莫西庄地区侏罗系三工河组层序地层学研究[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2012, 43(6): 2222–2230.
- Cui Jindong, Guo Jianhua, Li Qun. Sequence stratigraphy of Jurassic Sangonghe Formation in Moxizhuang Area, Junggar Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(6): 2222–2230.
- [21] Schutter S R. Characteristics of shale deposition in relation to stratigraphic sequence systems tracts[J]. *British Columbia*, 1998.
- [22] 曹鉴华, 王四成, 赖生华, 等. 渤海湾盆地束鹿凹陷中南部沙三下亚段致密泥灰岩储层分布预测[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(4): 480–485.
- Cao Jianhua, Wang Sicheng, Lai Shenghua, et al. Distribution prediction for tight marlstone reservoirs in lower 3rd Member of the Shahejie Formation in central and southern Shulu sag, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(4): 480–485.
- [23] 范春花, 王英民, 陈振岩, 等. 陈家洼陷沙三下亚段层序地层和沉积相分析[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2009, 31(2): 31–35.
- Fan Chunhua, Wang Yingmin, Chen Zhenyan, et al. Sequence stratigraphy and sedimentary facies of the sha 3 lower sub interval in Chenjia depression[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2009, 31(2): 31–35.
- [24] 郭建华, 官少波. 陆相断陷湖盆 T–R 旋回沉积层序与研究实例[J]. *沉积学报*, 1998, 16(1): 8–14.
- Guo Jianhua, Gong Shaobo, Wu Dongsheng. Sedimentary sequence of the T-R cycle and a studied example in the continental fault lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 8–14.

(编辑 张玉银)