

文章编号: 1000-0550 (2005) 04-0646-11

湖相碳酸盐岩高精度层序地层学探析

赵俊青¹ 夏 斌¹ 纪友亮² 姜在兴³ 张善文⁴

¹ (中国科学院广州地球化学研究所与南海海洋研究所 边缘海地质重点实验室 广州 510640)

² (同济大学海洋与地球科学学院 上海 200092) ³ (中国地质大学能源学院 北京 100083)

⁴ (中国石油化工股份公司胜利油田分公司 山东东营 257015)

摘 要 目前湖相碳酸盐岩是国内外沉积学研究的薄弱环节。应用层序地层学方法,以济阳坳陷沾化凹陷埕东地区沙一段的湖相碳酸盐岩为例,详细探讨湖相碳酸盐岩的层序地层学发育模式、层序地层单元划分级次以及控制因素等问题,重点对湖相碳酸盐岩准层序的类型、识别标志、形成机理以及对比模式进行了研究。研究表明,湖相碳酸盐岩可总结为陡坡和缓坡 2 种层序地层学发育模式;其高精度层序地层单元可划分为层序、体系域、准层序组、准层序、微层序 5 级;准层序类型可划分为陡坡型、缓坡型和深注型 3 大类和 L-M 型、滩坝型、滑塌型、深水蒸发型 4 小类,不同类型的准层序形成的主控因素各不相同;准层序的对比模式可总结为陡坡突变和缓坡渐变 2 种模式,在不同模式中准层序发生有规律的变化。

关键词 湖相碳酸盐岩 准层序 高精度层序地层 模式

第一作者 赵俊青 男 1974 出生 博士后 层序地层学 沉积学及石油地质

中图分类号 P539.2 **文献标识码** A

1 引言

湖相碳酸盐岩在地质历史中分布较少,所以人们对其重视和研究的程度远不如海相碳酸盐岩。虽然经过二十多年的研究,湖相碳酸盐岩在岩类学^[1~4]、相模式^[5~8]、储层特征^[9,10]、生油理论^[11~17]、古环境研究^[18~26]等方面取得了很大的成果,其中的较为系统的、代表性的著作当属 1990 出版的 *Carbonate Sedimentology*^[27] 和 1993 年出版的《中国湖相碳酸盐岩》^[28]。但是在湖相碳酸盐岩的分布演化规律、成因机理等方面的研究仍是国内外沉积学研究的薄弱环节,亟需新的理论和方法来指导。本文应用层序地层学方法对埕东地区沙一段的湖相碳酸盐岩进行了研究和探讨。

埕东地区位于东营市河口区北部的滩海地区,在构造单元属于渤海湾盆地济阳坳陷沾化凹陷孤北洼陷,范围包括埕东断层上升盘、下降盘及桩南断层以北的地区(图 1)。在埕东、孤北断层下降盘发育多个粒屑生物滩,孤北洼陷的碳酸盐岩沉积主要发育于沙四段上部和沙一段底部。沙一段主要发育薄层生物灰岩,其分布范围较广。孤北—桩南鼻状构造普遍发

育生物灰岩,最大厚度为 15 m,平均厚度为 3 m。处于埕东断层下降盘的桩 34 井在沙一段发育螺云岩约 100 m,并获得高产工业油流。碳酸盐岩储层在孤北地区普遍发育,岩性以生物灰岩和螺云岩为主,一般厚度 2~10 m。

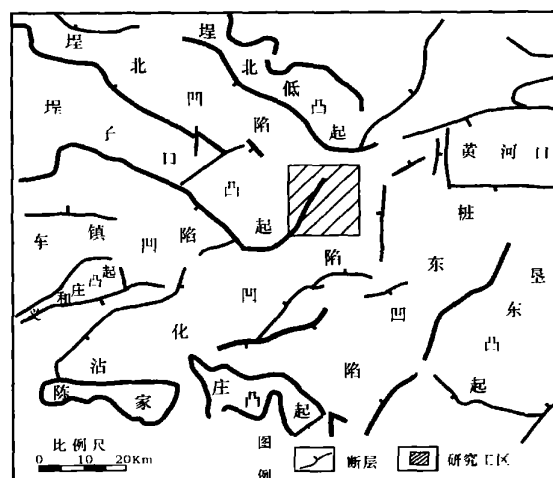


图 1 研究区位置图

Fig 1 The location of the study area

2 层序特征及发育模式

根据地震、测井和录井等资料,在综合研究的基础上建立了埕东地区的层序地层格架,其中将沙二段上一沙一段划分为一个完整的三级层序,低位域主要为沙二段上亚段的近岸水下扇沉积(图 2a,图 3a),湖侵体系域主要为沙一段早期的碳酸盐岩以及少量的碎屑岩滩坝和近岸水下扇沉积(图 2b,图 3b),高位体系域则为沙一段晚期的近岸水下扇和扇三角洲沉积(图 2c,图 3c)。从上述分析也可看出,碳酸盐岩沉积主要发育在湖侵体系域当中;同时由于构造位置的不同,在缓坡和陡坡的碳酸盐岩沉积又各具特色,据此建立了缓坡和陡坡 2 种碳酸盐岩沉积层序模式。

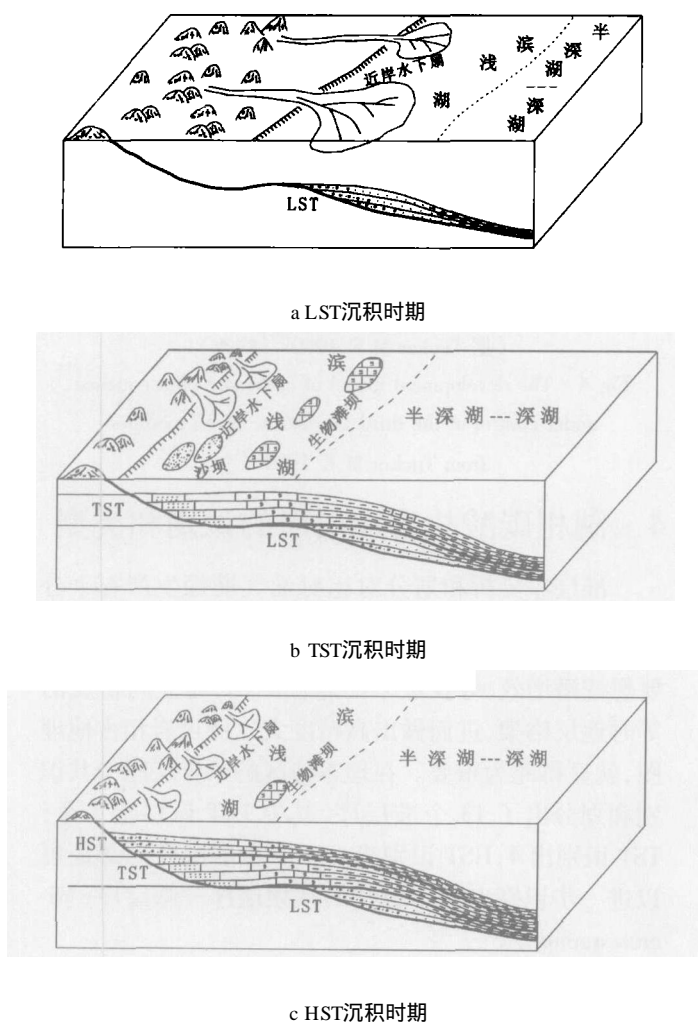


图 2 湖相碳酸盐岩缓坡层序模式

Fig 2 The gentle slope sequence model of lacustrine carbonate

2.1 缓坡层序模式

在缓坡一侧,碳酸盐岩沉积主要发育在滨岸地区,为碳酸盐砂坝、颗粒滩坝和生物浅滩沉积。由于

缓坡带地形较缓,湖泊水体的少量增加就会造成相对湖平面的快速上升,随着湖泊水体的增加,相对湖平面的上升速度不断增大,当相对湖平面上升的速度略大于碳酸盐沉积速度时,在滨岸地区沉积的沙体就会发生向岸方向的逐步退缩,导致层状沙体向湖岸的超覆,构成了具超覆关系的退积式准层序组,早期形成的碳酸盐沙体逐渐被淹没于较深的浅湖环境之中。在此环境中沉积的颗粒滩坝也具有类似的准层序组结构特征,而发育在水下隆起部位的生物浅滩,则发育加积—弱退积式准层序组。这两类沉积体,由于各个准层序时期形成的沉积物横向迁移叠加,且距离较近,故在平面分布形成了具双向超的丘状—透镜体形状。在半深湖—深湖相,由于湖平面的上升速率与碳酸盐沉积速率基本持平,对于发育在此带的各期泥晶灰岩和白云岩呈薄层状在垂向叠置分布,构成加积式准层序组。对于这两类碳酸盐岩,在平面上呈平行的薄片状分布(图 2b)。

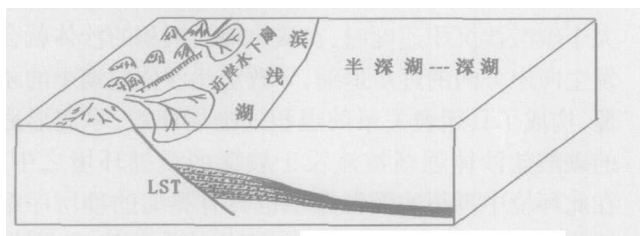
2.2 陡坡层序模式

对于陡坡一侧来讲,埕东断层对于碳酸盐岩层序的发育起着主要的控制作用,沉积的粒屑碳酸盐岩体厚达数十米至百米,并伴有较多的构造滑塌体,为异成因机制下的自旋回沉积作用过程的产物,其中桩 34 井的沙一段螺屑白云岩最为典型。由于埕东断层的持续活动造成可容空间的增长速率大于碳酸盐岩沉积速率,形成了退积式的准层序组序列。每一个准层序的下部为相对湖平面快速上升形成的薄层泥质白云岩或泥质岩构成;上部则由相对湖平面快速下降和断层活动造成的厚层弱固结碳酸盐岩重力滑塌物构成,其中还混杂有在风暴和洪水作用形成的陆源砂及部分断层崖滚砾。在湖侵体系域的晚期则发育薄层状的泥质灰岩的密集段沉积(图 3b)。

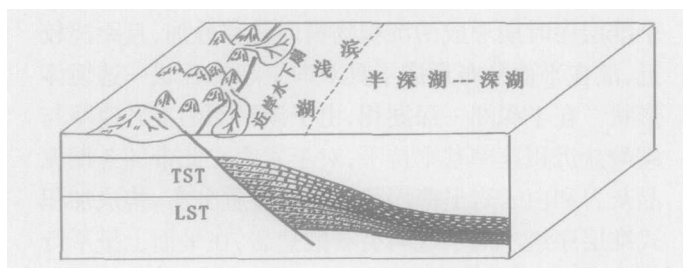
3 湖相碳酸盐岩高精度层序地层单元划分

湖相碳酸盐岩地层普遍具有多旋回性特征。这种多旋回性特征表明,其沉积过程受周期旋回因素的控制。引起这种周期性变化的根本因素是天文因素所引起的气候变化以及地壳和地幔活动所引起的区域性大地构造格局的改变。由此引起的盆地沉降、湖平面升降、沉积环境变化和生物发育状况等,都对湖相碳酸盐岩旋回式沉积相在横向上和纵向上的展布和排列形式有重要的控制作用^[29]。湖相碳酸岩旋回和层序的研究在油气勘探中具有极为重要的意义。这类研究可以了解沉积相组合、层序在时间和空间上

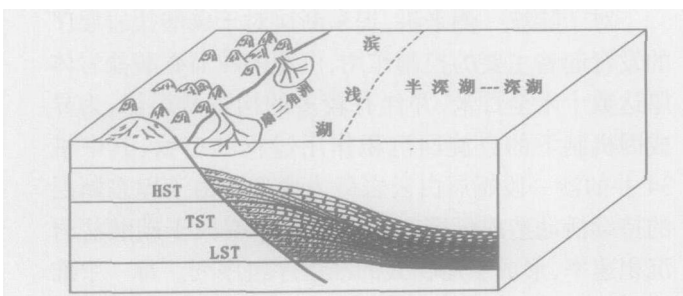
的重复规律以及岩层单元在横向的对比关系,从而在油气勘探中起到预测作用。



a LST沉积时期



b TST沉积时期



c HST沉积时期

图 3 湖相碳酸盐岩陡坡层序模式

Fig 3 The steep slope sequence model of lacustrine carbonate

在一个长周期湖平面变化的控制下,叠加于其上的短周期湖平面变化将产生一个有序叠加旋回层序。如在一个三级层序内部,高频湖平面变化稳定层序(准层序及微层序),具有一个有序的垂直叠加模式(图 4)。

这些都是由于不同周期的湖平面变化旋回产生不同空间幅度及时间进程的环境加深效应(湖平面上升)及环境变浅效应(湖平面下降)的综合作用的结果。

虽然湖相碳酸盐岩和海相碳酸岩盐在成分和结构、构造等方面有诸多的相似之处,但是由于湖泊的沉积条件,无论介质能量、生物作用和物源供给均与海洋无法相比,特别是湖相碳酸盐岩沉积周期短、速率大的特点,这就决定了湖相碳酸盐岩层序分级与海

相碳酸盐岩有很大的区别。综合我国中、新生界湖相碳酸盐岩的各种特征,并结合海相碳酸盐岩的层序分类可将其划分为五个级次。一级旋回层序为长周期旋回层序,属构造型湖平面变化的产物;二级——三级为中周期旋回,相当于长偏心率旋回;四级为短周期旋回,相当于短偏心率旋回;五级为超短周期旋回,相当于岁差旋回或黄赤交角旋回,其相应的层序地层术语见表 1。

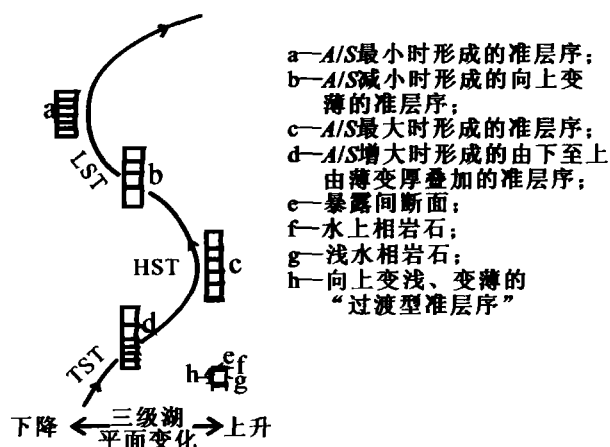


图 4 三级湖平面控制下的碳酸盐岩准层序发育模式
(据 Tucker M E, 1990^[27]修改)

Fig. 4 The development model of carbonate parasequence under control of the third lacustrine level(modified from Tucker M E, 1990^[27])

4 湖相碳酸盐岩准层序的识别和类型

准层序分析和划分对比对油气勘探生产有十分重要的意义。对于处于勘探和开发后期的油田来讲,要想挖潜增效,寻找更多的岩性圈闭,建立高精度的等时地层格架,进而做出高精度大比例尺岩相古地理图,就显得尤为重要。在埕东地区的第 1 层序中共识别和划分出了 13 个准层序,其中 LST 识别出 3 个; TST 识别出 4; HST 识别出 6 个。在准层序内部还可以进一步识别出更小级别的高频层序—微层序(Microsequence)。

4.1 准层序界面识别标志

准层序界面是一个小的湖泛面及其可对比的界面,其突出的将界面之下的浅水岩相与界面之上的较深水沉积分割开来,从而显示了小的沉积间断。在埕东地区的碳酸盐岩沉积当中主要有以下几种识别标志。

4.1.1 油页岩底界面

据准层序的过程可知,准层序的形成是一次小的

表 1 湖相碳酸盐岩层序的级次划分与特征

Table 1 The character and division of lacustrine carbonate sequence

层序级别	相应的层序地层学术语	形成时限 ^[30]	层序定义	主控因素	基准面旋回级次	与 Vail 相当的层序地层单元
一级	层序	1 ~ 10 Ma	由不整合面或与之整合面对应的整合面作为边界的一个相对整合的、有内在联系的地层序列	构造幕式性 强弱变化	长周期 旋回	相当级层序
二级	亚层序 (体系域)	0.3 ~ 0.5 Ma	一套水深变化幅度不大,彼此成因上有内在联系的同沉积序列的组合	偏心率长 周期	中周期 旋回	相当级
三级	准层序组	400 ka	一系列具有明显叠加模式的、有内在联系的准层序系列	偏心率短 周期	短周期 旋回	级层序
四级	准层序	100 ka	由一个湖泛面或与之相对应的界面为边界的、相对整合的、有内在联系的岩层或岩层序列所组成	岁差周期	超短周 期旋回	级层序
五级	微层序	20 ka 或 40 ka	一套代表最小成因单元的单一岩性或相关岩性的叠加样式			

湖泛旋回,这一小的湖泛旋回实际是由 3 个小阶段组成的,第 1 个小阶段是快速的湖进时期,其作用以冲刷破坏为主;第 2 个小阶段是湖泛水体稳定发育期,此时矿物碎屑沉积速率缓慢,但由于水深然变化,加速了生物死亡速率。造成了有机质堆积速度的相对升高。第 3 个小阶段是“河流”复活阶段,矿物质碎屑供应和生物死亡速度逐渐趋于正常,从而结束了富含有机质的相对深水沉积,形成了水深逐渐变浅的碳酸盐岩沉积物^[31]。因此,油页岩的底界面可作为准层序界面。在埕东地区的沙一段湖侵体系域中的大部分准层序即多以油页岩底界面为界。

4.1.2 较厚滑塌沉积层顶界面

可作为准层序划分界限:其原因是湖泛作用多为突发性事件引起,伴随突发性事件的发生,加之湖泛作用造成的先期沉积物含水饱和度与其坡度的不适应,易于在较深水相带形成广泛发育的滑塌沉积层,因此,滑塌沉积层的出现往往代表着湖泛作用的发生,故其顶界面可作为准层序界面。这种类型的准层序界面,在埕东断层下降盘多见,尤以桩 34 井最为典型。

4.1.3 界面之下为灰质泥岩夹薄层白云岩,之上为油页岩和泥岩沉积

这种类型的准层序主要发育在湖侵体系域晚期的半深湖—深湖相中。由于高频率湖平面上升超过碳酸盐生产及堆积速率形成“瞬时淹没事件”而产生加深饥饿间段面。同时由于湖平面快速上升造成生物死亡,在准层序下部形成含介形虫等微生物的油页岩和泥岩沉积。在湖平面下降期间,碳酸盐生产恢复正常,生物在自营养性作用中产生大量的 CO₂ 等气体,同时,菌、藻类等微生物在还原环境下分解藻体产

生大量 CO₂ 气体和 HCO₃⁻,它们溶解在水体中提高了 pH 值,形成了灰质泥岩夹薄层白云岩。

4.2 准层序类型

根据湖相碳酸盐岩准层序发育部位的不同,可将其划分为陡坡型、缓坡型和深洼型 3 大类,根据其成因机制的不同进一步具体又可划分为 L—M 型、滩坝型、滑塌型、深水蒸发型 4 种类型。

4.2.1 缓坡型准层序

主要为碳酸岩盐滩坝型准层序,该类准层序主要形成于湖盆缓坡带边缘部位,受波浪作用影响强烈,根据湖地地貌及湖盆水动力条件、沉积条件和沉积体的特征,又可分为以下 2 种类型。

砂质滩坝型

该类准层序主要形成于缓坡高能斜坡边缘,下部岩石单元为浅湖相的介形类泥岩和壳灰岩,上部岩石单元为由岸线进积和波浪簸选产生的鲕粒砂构成,主要为浅灰的鲕粒白云岩,含核形石砂屑白云岩,具块状层理、交错层理、水平层理(图 5)。

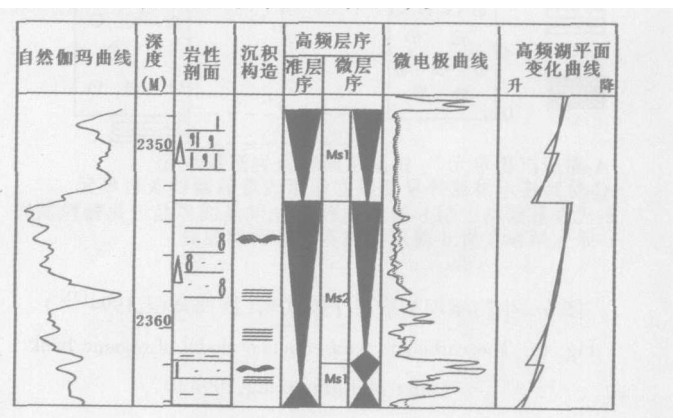


图 5 碳酸岩盐砂质滩坝型准层序模式图

Fig 5 The carbonate parasequence model of sandy bank

生物滩坝型

准层序下部的高频湖侵单元主要发育薄层的灰质泥岩及灰质油页岩,其上部岩石单元为发育交错层理的块状鲕粒灰岩,属于高能均衡堆积单元,该岩石单元的下部为原生亮晶—泥晶鲕粒灰岩,上部单元为单晶鲕、多晶鲕等铸模鲕粒灰岩(由白云石晶体构成),及为受淡水成岩作用改造的岩石单元。伴随着时间较短的暴露使鲕粒灰岩的上部受到淡水淋滤作用的改造,该暴露间断面由于早期淡水成岩作用而石化快,故也形成一硬地,见生物钻孔于灰岩顶部,其上部局部见暴露粘土层。也就是说,高频率湖平面升降变化过程中,碳酸盐生产和堆积速率从低到高,从而形成滞后沉积单元(A)及均衡堆积单元(B和C),最后由于短期暴露则碳酸盐又停止生长,使鲕粒灰岩单元受到淡水流体改造,最后形成向上变浅、向上变粗、向上变厚的准层序(图6)。确切地讲,这种准层序的界面既是暴露间断(上一准层序的向上变浅所致),又是加深饥饿间断(下一准层序的湖平面快速上升所致)的综合特点。这种准层序的横向变化规律为:从浅到深其滞后沉积单元变厚而均衡堆积单元变薄。它虽然是异成因机制控制下的自旋回沉积过程的产物,但也不排除自旋回机制,在其均衡沉积单元形成过程中不排除波浪、潮汐、风暴产生的进积作用及本身的垂向加积作用。

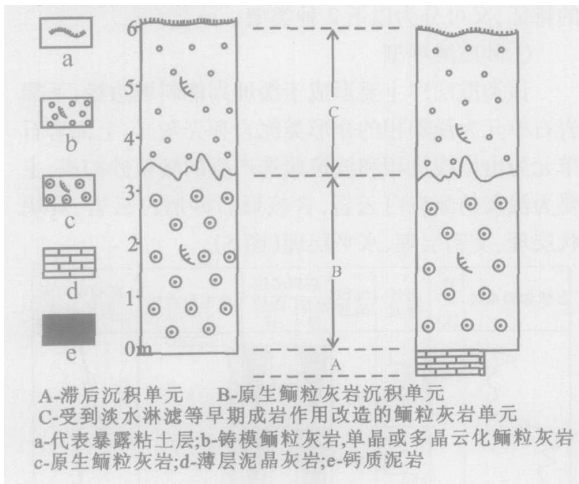


图 6 生物滩坝型准层序模式图(据梅冥相,1994^[32])

Fig 6 The carbonate parasequence model of organic bank (after Mei Mingxiang, 1994)

4.2.2 陡坡型准层序

主要为滑塌型准层序,该类准层序一般发育在高能陡坡阶地部位。构成准层序的微层序下部由构造

活动相对平静,沉积相对稳定的泥质白云岩或灰质泥岩构成。微层序上部则是由构造活动相对强烈时期,阶地斜坡产生的白云质生物灰岩滑塌形成,并显示了非分选特征(具有颗粒流和崩塌作用)。斜坡沉积物中较厚的鲕粒生物灰岩层由具有一定角度的向湖侵斜的前积层构成,沉积物则是由具薄包壳的中砂级鲕粒组成。这种特征在岩心观察中见到,在白云质生物灰岩发育有前积纹层。每个准层序由2~3个微层序构成(图7)。这类准层序在埕东断层下降盘一侧的桩34井、埕东1井最为典型。

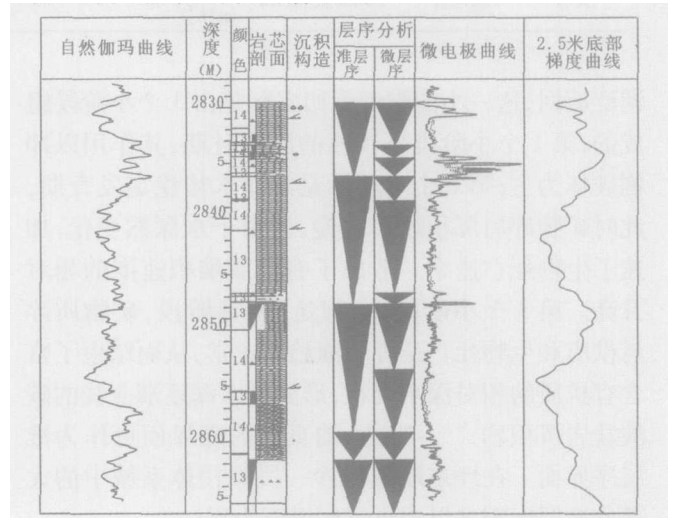


图 7 陡坡滑塌型准层序模式图

Fig 7 The carbonate parasequence model of slump sediment

4.2.3 深洼型准层序

根据成因机理的不同可划分为深水蒸发型和L—M型2类碳酸盐岩准层序。

深水蒸发型准层序

该类准层序主要形成于湖侵体系域时期的半深湖—深湖环境之中,其中每一个准层序又是由2~3个更小级别的微层序构成。每个微层序的下部高频深水湖侵单元的岩石类型主要是灰褐色、褐色、的灰质油泥岩及油页岩和黑色泥岩;微层序的上部高频下降域部分则是由灰褐、暗褐—黑色的具微细水平层理—水平层理、季节纹理层的泥质泥晶白云岩、泥质白云岩、隐晶白云岩及纹层状白云岩或白云质砂岩构成,白云岩中含有生物碎片化石,以介形虫为多见(图8)。

这种类型的准层序的形成应具备以下条件^[41]:

- (1)半潮湿和潮湿的较炎热的古气候;
- (2)沉积水体

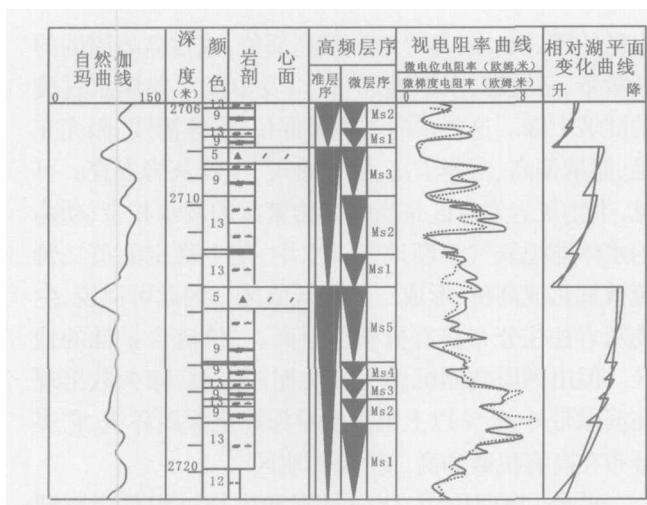


图 8 深水蒸发型准层序模式图

Fig 8 The carbonate parasequence model of deep-water evaporate

的水化学类型应为碳酸盐型,其离子组成必须具有富 K^+ 、 Na^+ 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} ,而贫 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的特点;(3)古水介质应偏碱性 pH值 9,古盐度较低一般为 3‰~10‰,即微咸水 (0.5‰~5‰)至半咸水 (5‰~30‰),或更高的盐度范围,但白云岩沉积对盐度的要求并不严格;(4)具有湖泊全盛时期较稳定的浅湖、较深湖、深湖环境;埕北凹陷在沙一段沉积时期具备上述条件,故在凹陷中央的老 45、老 46、老 451 井区,该种类型的准层序最为发育。

L—M 型碳酸盐岩准层序

该类型准层序由形成于较深水的深湖及半深湖环境中的泥晶灰岩 (Limestone)及泥灰岩或钙质泥岩 (Marl)或页岩组成,故简称 L—M 型。这类准层序的高频湖侵单元 (下部岩石单元)由含泥质物较多的钙质泥岩、页岩及泥灰岩等构成,其上部单元为含碳酸盐岩组分较多的薄层泥晶灰岩组成 (图 9)。根据其组成的成因岩石单元的岩石类型,水深由深变浅具有以下变化序列:“黑色页岩—泥灰岩米级旋回层序”—“钙质泥岩—泥灰岩米级旋回层序”—“泥灰岩—泥晶灰岩米级旋回层序”。

L—M 型准层序主要形成于浪基面以下的深水环境中,在这种深水环境中发育的韵律层可能与米兰科维奇旋回具有某种间接的成因联系,但更重要的可能是与沉积物来源的周期变化有关。

L—M 型准层序的识别标志是:下部单元陆源细粒沉积物组分多而上部岩石单元的碳酸盐岩组分多。

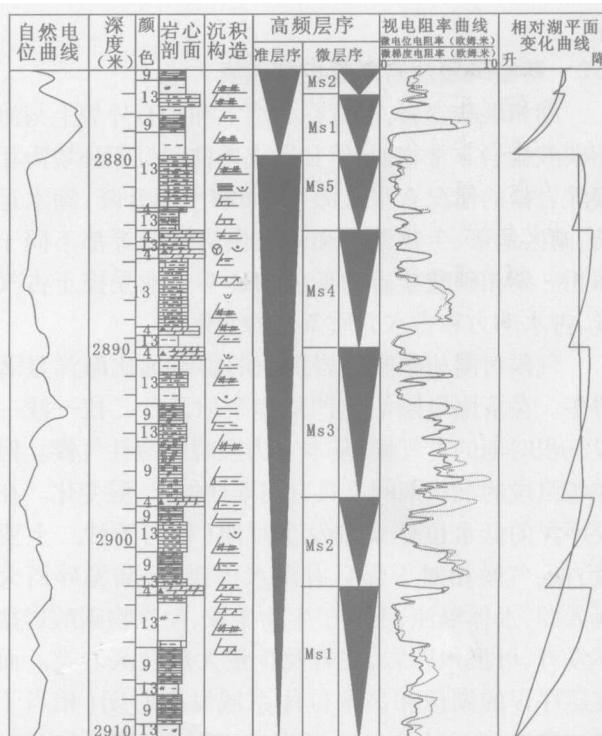


图 9 L—M 型碳酸盐岩准层序模式图

Fig 9 The carbonate parasequence model of limestone-marl

5 湖相碳酸盐岩准层序的形成机制及控制因素

5.1 湖相碳酸盐岩准层序的形成机制及模式

碳酸盐岩准层序及其更小级别的高频层序是地层记录中最小的异成因地层堆积单元,它们之间的边界是由非沉积过程产生,这些界限的存在是区域间断事件的标志,也就是从前所指的幕式沉积作用的佐证。每一准层序及其更小级别的旋回层序符合 Anderson 和 Goodwin^[33]提出的 PAC (Punctuated—Aggradational Cyclic genesis)旋回机制,即高频层序在一个沉积间断面之上由均衡堆积过程产生。该沉积间断面形成于湖平面的“加深事件”—湖平面上升超过碳酸盐生产及堆积速率所产生的瞬时淹没形成的饥饿间断事件。其实,高频层序之间的间断面既有加深饥饿间断也存在暴露间断面,在一次高频湖平面升降旋回过程中,在古地理背景稍深的地方湖平面快速上升就容易产生“瞬时淹没事件”而产生加深间断面;而在古地理背景较浅的地方起因于湖平面上升的环境加深效应不如湖下降产生的“变浅效应”明显,故发育暴露间断面。如图 10 所示,在一次高频湖平面变化旋回中,在不同古地理背景下形成不同类型的准层

序。

5.2 湖相碳酸盐岩形成控制因素

湖相碳酸盐岩, 尽管在类型上和岩石外貌上与海相碳酸盐岩非常相似, 但其形成条件和沉积环境海相碳酸盐岩的情况有很大差别, 如湖平面升降、湖水运动、湖区地形、生物繁衍和碎屑供给情况等都不不同于海相。湖相碳酸盐岩的形成的还明显地受控于古气候、古水动力和古水介质条件的变化。

气候对湖相碳酸盐岩沉积的影响远比海洋显著得多。在济阳拗陷沾化凹陷埕东地区沙二段—沙一段沉积时期的古气候, 基本上为温暖潮湿性气候。但在各组段的沉积期间又具有周期性的干、湿变化。在层序的低水位体系域发育时期 (相当于沙二上亚段) 期, 气候相对干燥且有洪水入侵时, 陆源碎屑大量入湖, 水体混浊, 不利于生物生长, 使生物碳酸盐岩不发育, 可沉积砂岩、泥岩及少量无颗粒灰岩类。而在层序的湖侵和高水位体系域发育时期 (相当于沙一段), 气候较沙二段沉积末期湿润, 湖盆加深扩展, 由于降雨量达, 河流发育, 河流向湖盆带入大量陆源碎屑物质和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等成分。当河水受到湖水顶托时, 如湖陆源碎屑减少, 水体清澈, 适宜生物繁衍, 导致生物碳酸盐岩相对发育。由于气候的干湿变化频繁, 形成了多层次的湖相碳酸盐岩旋回层序。

淡水到半咸水碳酸盐岩的发育状况与生物的发育程度密切相关。在适于大量生物繁衍的环境中, 如浅

水区的滩、坝、堤、岛等地形较高部位, 或古岛屿周围的断阶带、斜坡带、水下隆起带, 以及由浅水向深水过渡的陡坡上缘。这些正向古地形部位, 水体清浅、阳光充足、能量偏高、营养丰富、生物繁茂, 生物灰岩发育。可见, 生物灰岩发育区是当时生物繁盛的浅水相带, 动荡的水体能把氧气不断地带入水中, 使不稳定的负二价硫被氧化成高价, 形成二价硫低值区。因此可以说, 生物灰岩往往分布在有机碳含量高、二价硫含量低的地区。但由钙质微晶沉淀而成的泥灰岩类, 除少数出现在滨岸带外, 95%以上出现于半深湖至深湖环境, 它多分布在高有机碳和高二价硫的地区^[22]。

此外, 物理作用、化学过程和生物过程都会影响湖相碳酸盐岩的沉积, 其性质和作用均有别于海相^[28]。

6 湖相碳酸盐岩高精度层序地层单元对比研究

湖相碳酸盐岩由于其沉积范围小, 沉积厚度薄, 横向变化快, 非均质性强的特点, 使得准确地预测和开发碳酸盐岩油气藏存在许多困难, 因此如何正确地把不同期次碳酸盐岩的沉积区别开来, 对于勘探和开发具有重要的理论意义和实际价值。

对于高频的湖相碳酸盐岩层序而言, 准层序是其基本的层序地层研究单元。在每一个准层序内部的碳酸盐岩基本上都是沉积条件稳定的情况下形成的。

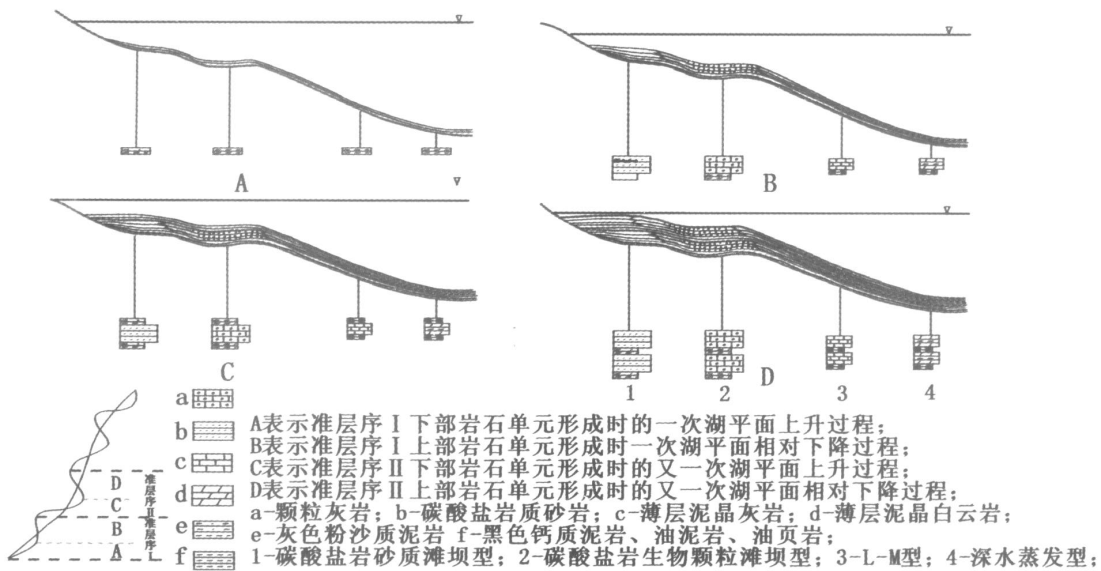


图 10 碳酸盐岩准层序及其高频层序的成因图解

Fig. 10 The genetic graph analysis of carbonate parasequence and high-frequency sequence

因此,以准层序为划分对比单元格架来研究湖相碳酸盐岩,可以对油气勘探起到指导作用。

在埕东地区湖相碳酸盐岩发育的湖侵体系域中,利用地质、地震、测井及地球化学等资料共识别出 4 个准层序。从湖盆边缘到湖盆中央,随着基准面和可容空间的变化,准层序的厚度和内部岩石组合关系发生变化有规律的变化。

6.1 缓坡带碳酸岩盐准层序划分与对比

在埕东断层的上升盘缓坡带,埕东凸起的边缘缺失第 1~3 准层序,仅发育第 4 个准层序;在盆地的其余部位 4 个准层序发育齐全。在靠近凸起的准层序 1、2、3 类型主要为砂质滩坝型和生物滩坝型;在每个准层序的下部高频湖侵单元发育 2~5m 厚的黑色泥岩和油页岩,可做为等时对比的界限。而且每个准层序的上部高频湖退单元的碳酸盐岩厚度较下部湖侵

单元大。由盆地边缘的滨岸相带到浅湖相带,准层序 1、2、3 下部的高频湖侵泥页岩的厚度增大,与上部的高频湖退单元发育的碳酸岩盐颗粒浅滩厚度近于 1:1。到深湖—半深湖环境下碳酸盐岩准层序结构明显发生变化,变为深水蒸发型准层序;其下部的高频湖侵单元部分厚度增大,上部的高频湖退岩石单元厚度减小,变为 0.5 m 左右的白云岩夹层(图 11)。

在埕东地区的缓坡带发育的 4 个准层序当中,颗粒碳酸岩盐生物滩坝主要发育在第 1、2 准层序当中,且第 2 准层序碳酸岩盐厚度和范围大于准层序 1 中的碳酸盐岩。这是因为准层序 2 发育时期的可容空间大于准层序 1,且该时期的水体深度最适合生物的繁殖和碳酸岩盐的沉积。同时,各准层序由盆地中央向埕东凸起逐层超覆,垂向构成一个退积式准层序组序列。

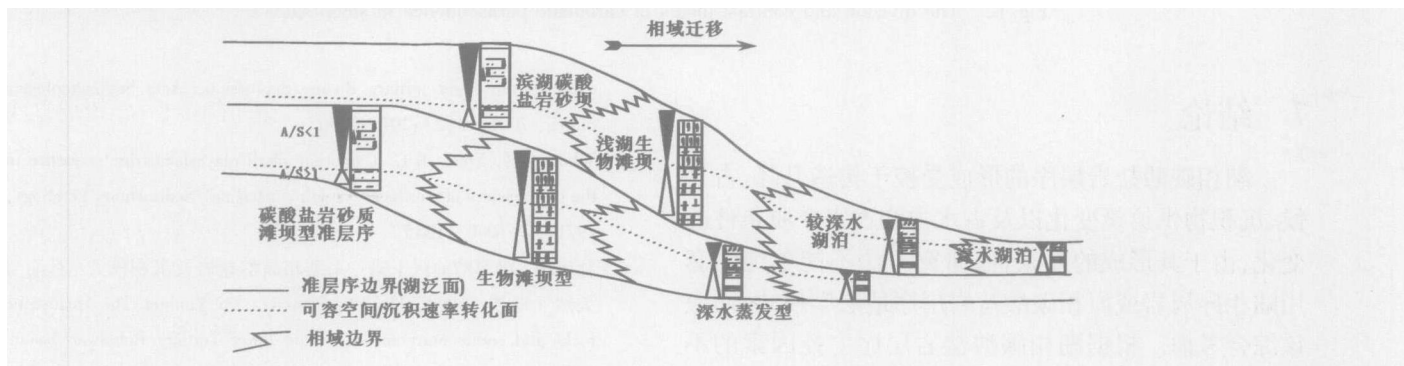


图 11 缓坡带碳酸岩盐准层序的演化模式

Fig 11 The development model of carbonate parasequence in gentle slope

6.2 陡坡带碳酸盐岩准层序的划分与对比

在埕东断层的下降盘一侧,湖侵体系域的 4 个准层序在下降盘一侧发育齐全,且厚度也较上升盘厚,同时由于其所处构造位置的不同,其碳酸岩盐准层序结构样式也与缓坡带一侧有很大的差异。沿着埕东断层下降盘一侧,即沿着沉积走向(平行于湖泊的古岸线),碳酸岩盐岩相变化很快,横向上碳酸盐岩的发育与碎屑岩的发育互为消长关系,即在相同的相域和水深条件下,在同一沉积部位,如碳酸盐岩很发育则碎屑岩不甚发育,反之亦然。

如在靠近埕东断层位于滨浅湖区的桩 36 井区第 1~3 准层序为近岸水下扇沉积,而在相邻的桩 34 井区第 1~3 准层序则为鲕粒生物灰岩滑塌沉积。在距埕东断层稍远处于浅湖区域的老 20 井区和老 5 井区情况相同,在老 20 井区,为退积式近岸水下扇沉积,各准层序均由薄层深灰色泥岩和厚层的浅灰色砂岩

构成;老 5 井区,准层序 1、2 变为由薄层的深灰色泥岩和厚层生物灰岩构成的准层序样式,准层序 3、4 主要由泥页岩、泥质灰岩、纯泥岩夹薄层的灰质白云岩组成。在半深湖—深湖相区上述情况不是很明显,但是沉积仍有差异,在老 13—老 15 井区附近,各准层序虽均以泥质岩发育为特征,但在各准层序内部由下向上泥岩中的灰质含量逐渐增多,个别准层序在顶部变为薄层的泥质白云岩、泥质灰岩沉积;而在老 17 井区,4 个准层序均由半深湖—深湖相的纯泥岩、油页岩构成(图 12)。

在垂向上碳酸盐岩沉积和碎屑岩沉积可以共存,如在桩 35 井区,准层序 1 为薄层的近岸水下扇中席状砂沉积,准层序 2、3 为大套的灰黑色油页岩、灰质泥岩夹薄层泥质灰岩、泥晶灰岩、细晶白云岩,偶夹薄层生屑灰岩及近岸水下扇席状砂的沉积序列(图 12)。

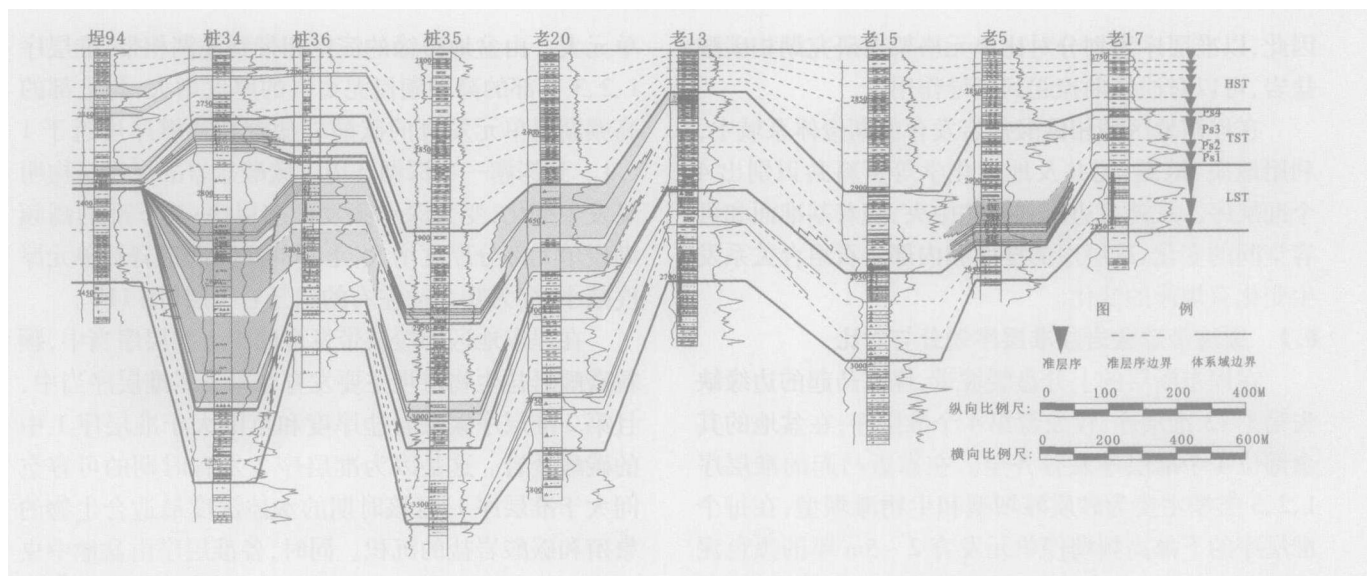


图 12 陡坡带碳酸盐岩准层序的划分与对比模式图

Fig 12 The division and contrast model of carbonate parasequence in steep slope

7 结论

湖相碳酸盐岩层序的形成受控于构造升降、古气候、沉积物供给量变化以及古水力和古水介质条件的变化,由于其形成的复杂性,研究方法不能单纯的套用陆相碎屑岩或海相碳酸盐岩层序地层学模式,而应该综合考虑。根据湖相碳酸盐岩层序主控因素的不同级次,将其划分为五个级别。准层序做为高精度层序地层学研究的基本单元,其研究具有重要意义的理论,根据湖相碳酸盐岩准层序发育部位的不同,可将其划分为陡坡型、缓坡型和深洼型 3 大类,根据其成因机制的不同具体又可划分为 L—M 型、滩坝型、滑塌型、深水蒸发型 4 种类型。

参考文献 (References)

- Pozo M, Leguey S, and Medina J A. Sepiolite and playogorskite genesis in carbonate lacustrine environments (Duro Basin, Spain). *Chemical Geology*, 1990, 84 (4): 290 ~ 291
- 张晓宝. 准噶尔盆地南缘东部中二叠统芦草沟组黑色页岩中白云岩夹层的成因探讨. *沉积学报*, 1993, 11 (2): 133 ~ 138 [Zhang Xiaobao. The cause of formation on dolomite interlayer of black shell in the Loucaogou formation of middle Dyas series in the southeast of Junggar basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1993, 11 (2): 133 ~ 138]
- Wright V P, Abnson Zarza M, Sanz M E, *et al* Diagenesis of late Miocene micritic lacustrine carbonates, Madrid basin, Spain. *Sedimentary Geology*, 1997, 114: 81 ~ 95
- 黄杏珍, 邵宏舜, 闫存凤, 等. 泌阳凹陷下第三系湖相白云岩形成条件. *沉积学报*, 2001, 19 (2): 207 ~ 213 [Huang Xingzhen, Shao Hongshun, Yan Cunfeng, *et al* Sedimentary condition of lacustrine dolomite in the lower tertiary Biyang depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19 (2): 207 ~ 213]
- White A H, Youns B C. Cambrian alkali playa-lacustrine sequence in the northeastern officer basin, south Australian. *Sedimentary Petrology*, 1971, 39: 1040 ~ 1045
- 杜福华. 渤海湾地区下第三系湖相碳酸盐岩及沉积模式. *石油与天然气地质*, 1990, 11 (4): 34 ~ 41 [Du Yunhua. The lacustrine rocks and sedimentary model in the lower Tertiary Bohaiwan basin. *Oil&Gas Geology*, 1990, 11 (4): 34 ~ 41]
- 黄杏珍, 闫存凤, 王随继, 等. 苏打湖型的湖相碳酸盐岩特征及沉积模式. *沉积学报*, 1999, 17 (增刊): 728 ~ 733 [Huang Xingzhen, Yan Cunfeng, Wang Suiji, *et al* The feature and deposit model of lacustrine carbonate rocks formed in the course of soda lake evolution. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17 (Supp): 728 ~ 733]
- 谢庆宾, 管守锐, 李熙哲. 山东平邑盆地官中段沉积环境和层序地层特征. *沉积学报*, 1999, 17 (1): 71 ~ 77 [Xie Qingbin, Guan Shouwei, Li Xizhe. Depositional environment and stratigraphy sequence characteristics of middle member of Guanzhou formation in the Pingyi basin, Shandong. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17 (1): 71 ~ 77]
- 邓运华, 张服民. 歧口凹陷沙一段下部碳酸盐岩储层的成岩后生作用研究. *石油学报*, 1990, 11 (4): 33 ~ 40 [Deng Yunhua, Zhang Fuming. Epidiagenesis of carbonate rocks in the first subgroup of Shahejie formation Qikou depression. *Acta Petrolei Sinica*, 1990, 17 (1): 71 ~ 77]
- 周书欣, 王建国. 湖相碳酸盐岩的石油地质意义. *石油实验地质*, 1993, 15 (4): 361 ~ 369 [Zhou Shuxin, Wang Jianguo. The implications of petroleum geology of lacustrine. *Experimental Petroleum Geology*, 1993, 15 (4): 361 ~ 369]
- Wright V P, Wilson R C L. Lacustrine carbonates and source rocks

- from the Upper Jurassic. Abstr. 6th Eur. Reg. Mtg. Int. Ass. Sedimentol. 1985. 487~490
- 12 妥进才,邵宏舜,黄杏珍. 湖相碳酸盐岩生油岩及其有机地球化学特征—以柴达木盆地第三系为例. 石油实验地质, 1995, 17(3): 272~276 [Tuo Jincan, Shao Hongshun, Huang Xinzhen. Lacustrine carbonate source rocks and their organic geochemical characteristics—Taking the Tertiary system of Qaidam basin as an example. *Experimental Petroleum Geology*, 1995, 17(4): 272~276]
 - 13 妥进才,黄杏珍. 湖相碳酸盐岩生油岩研究进展. 地球科学进展, 1996, 11(6): 585~589 [Tuo Jincan, Huang Xinzhen. Advances on lacustrine carbonate source rocks research. *Advances in Earth Sciences*, 1996, 11(6): 585~589]
 - 14 Tuo Jincan, Wang Xianbin, Chen Jianfa. Distribution and evolution of tricyclic terpanes in lacustrine carbonates. *Organic Geochemistry*, 1999, 30: 1429~1435
 - 15 闫存凤,邵宏舜,黄杏珍. 泌阳凹陷核桃园组碳酸盐岩系孢粉相及烃源岩评价. 沉积学报, 1998, 16(3): 115~118 [Yan Cunfeng, Shao Hongshun, Huang Xingzhen, *et al*. Palynofacies and oil potential of lacustrine carbonate rocks of Tertiary Hetaoyuna formation in the Biyang depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 115~118]
 - 16 张成君,孙柏年,崔彦立. 湖相碳酸盐岩有机质热演化产物及其碳同位素组成特征. 兰州大学学报(自然科学版), 2001, 37(1): 87~92 [Zhang Chengjun, Sun Bainian, Cui Yanli. Thermolysis production of lacustrine carbonate organic matter and its carbon isotopic composition characteristics. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2001, 37(1): 87~92]
 - 17 邵宏舜,黄杏珍,闫存凤,等. 泌阳凹陷湖相碳酸盐岩未成熟石油的形成条件. 地球化学, 2002, 31(3): 266~272 [Shao Hongshun, Huang Xingzhen, Yan Cunfeng, *et al*. Conditions for the formation of immature oil in lacustrine carbonate rocks in Biyang depression. *Geochimica*, 2002, 31(3): 266~272]
 - 18 Longnan M W. Carbonate diagenetic features from nearshore diagenetic environment. *AAPG Bulletin*, 1980, 64: 461~487
 - 19 邓运华. 歧口凹陷沙一段下碳酸盐岩形成环境. 石油勘探与开发, 1990, 17(1): 8~13 [Deng Yunhua. An analysis of depositional environment of carbonate rocks in the first subgroup of Shahejie formation Qikou depression. *Petroleum Exploration and Development*, 1990, 17(1): 8~13]
 - 20 邓运华. 试论辽东湾坳陷沙河街组碳酸盐岩形成环境及其特征. 石油勘探与开发, 1991, 18(6): 32~39 [Deng Yunhua. A discussion on the environment of formation and the characteristics of the carbonate rocks in the Shahejian formation in the Liaodong bay basin. *Petroleum Exploration and Development*, 1991, 18(6): 32~39]
 - 21 Larry Benson. Factors affecting ^{14}C ages of lacustrine carbonates: timing and duration of the last highstand lake in the Lahontan Basin. *Quaternary Research*, 1993, 39(2): 163~174
 - 22 闫存凤,黄杏珍,王随继. 泌阳凹陷核桃园组湖相碳酸盐岩系藻类组合及古环境. 沉积学报, 1996, 14(增刊): 57~62 [Yan Chunfeng, Huang Xingzhen, Wang Suiji. The algae combination and paleoenvironment of lacustrine carbonate of Tertiary Hetaoyuna formation in the Biyang depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(Supp): 57~62]
 - 23 刘传联. 东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩碳、氧同位素组及其古湖泊学意义. 沉积学报, 1998, 16(3): 109~114 [Liu Chuanlian. Carbon and oxygen isotopic compositions of lacustrine carbonates of Shahejian formation in the Dongying depression and their paleolimnological significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 109~114]
 - 24 Wei K, Gasse F. Oxygen isotopes in lacustrine carbonates of West China revisited: implications for post glacial changes in summer monsoon circulation. *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18: 1315~1334
 - 25 Dutkiewicz A, Herczeg A L, Dighton J C. Past changes to isotopic and solute balances in a continental playa: clues from stable isotopes of lacustrine carbonates. *Chemical Geology*, 2000, 165: 309~329
 - 26 Bustillo M A, Arribas M E, Bustillo M. Dolomitization and silicification in low-energy lacustrine carbonates (Paleogene, Madrid Basin, Spain). *Sedimentary Geology*, 2002, 151: 107~126
 - 27 Tucher M E, Wright V P. *Carbonate Sedimentology*. Oxford London: Blackwell Scientific Publications, 1990
 - 28 王英华,周书欣,张秀莲著. 中国湖相碳酸盐岩. 北京:中国矿业大学出版社, 1991. 9~123 [Wang Yinghua, Zhou Shuxin, Zhang Xiulian. *The Lacustrine Carbonate in China*. Beijing: China Mining University Press, 1991. 9~123]
 - 29 马永生,梅冥相,陈小兵,等. 碳酸盐岩储层沉积学. 北京:地质出版社, 1999. 104~116 [Ma Yongsheng, Mei Mingxiang, Chen Xiaobin, *et al*. *The Reservoir Sedimentology of Carbonate Rocks*. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 104~116]
 - 30 梅冥相. 碳酸盐岩旋回与层序. 贵阳:贵州科技出版社, 1993. 25~30 [Mei Mingxiang. *The Cycle and Sequence of Carbonate Rocks*. Guiyang: The Technological Publishing House of Guizhou, 1993. 25~30]
 - 31 董清水,崔宝琛,李想,郭巍. 陆相层序地层划分及岩芯、测井高分辨率层序界面判别. 石油实验地质, 1997, 19(2): 121~126 [Dong Qingshui, Cui Baoshen, Li Xiang, Guo Wei. The division continental sequence stratigraphy and the identification of its interface with high-resolution core analyses and well logging. *Experimental Petroleum Geology*, 1997, 19(2): 121~126]
 - 32 梅冥相,罗光文,苏德辰. 碳酸盐岩成因复合海平面变化旋回层序. 桂林冶金地质学院学报, 1994, 14(2): 145~153 [Mei Mingxiang, Luo Guangwen, Su Dechen. Carbonate allogenic cyclic sequence of composite sea-level change. *Journal of Guilin College of Geology*, 1994, 14(2): 145~153]
 - 33 Good P W, Anderson E J. Punctuated aggradation cycles: a general hypothesis of episodic stratigraphic accumulation. *Geology*, 1985, 93: 515~533
 - 34 周书欣,赖特 V P, 普拉特 N H, 威廉斯 B P J. 湖泊沉积体系与油气. 北京:科学出版社, 1991. 81~113 [Zhou Shuxin, Lester V P, Pulater N H, Williams B P J. *The Lake Sedimentary System and Oil-gas*. Beijing: Science Press, 1991. 81~113]

Analysis of the High Resolution Sequence of Lacustrine Carbonate

ZHAO Jun-qing¹ XIA Bin¹ JI You-liang² JIANG Zai-xing³ ZHANG Shan-wen⁴

¹ (Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry & South China Sea

Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

² (Institute of Earth and Ocean Science, Tongji University, Shanghai 200092)

³ (China University Geoscience, Beijing, 100083)

⁴ (Shengli Oil Field Limited Corporation, SINOPEC, Dongying, Shandong 257015)

Abstract In spite of great economic significance, very little is known about the lacustrine carbonate rocks both at home and abroad. By the method of applying sequence stratigraphy, this paper particularly analyses the sequence developing model, sequence gradation division and controlling factors on lacustrine carbonate rocks, and put emphasis on parasequence types, distinguishing symbol, forming mechanism and correlation model. As a result, the sequence model of lacustrine carbonate rocks is summed up as steep slope model and gentle slope model. The units of high-resolution sequence are divided into sequence, tract system, parasequence sets, parasequence and microsequence. The parasequence types are divided into steep slope type, gentle slope type and deep sag type, also divided into limestone-marl, shore, slipping and deep-water evaporate, and the controlling factor of different kinds of parasequence is different. The contrasting models of parasequence are summed up as abruptly changing model of steep slope and gradually changing model of gentle slope, parasequence can regularly change under different models.

Key words lacustrine carbonate rocks, parasequence, high resolution sequence, model