

文章编号: 1000-0550 (2005) 01-0084-07

断陷湖盆中强制湖退沉积作用及其成因机制

操应长

(石油大学(华东)地球资源与信息学院 山东东营 257061)

摘要 断陷湖盆中相对湖平面下降引起的湖退作用称之为强制湖退作用。强制湖退作用时期若存在沉积物供给盆地,将加速湖退作用,并形成一套具有明显前积结构的强制湖退前积体。强制湖退前积体的顶积层不发育,地震剖面上具斜交前积反射结构。强制湖退前积体的顶界面为层序界面,且伴随有下切谷的形成。气候变化、构造抬升和边界断层的幕式断陷活动引起的盆地缓坡带基底差异沉降运动均可引起断陷湖盆中相对湖平面的下降,也是引起强制湖退作用的三大成因机制。强制湖退前积体具有良好的油气成藏条件,是隐蔽油气藏有利勘探目标。

关键词 断陷湖盆 强制湖退 层序地层 成因机制

作者简介 操应长 男 1969年出生 博士 副教授 沉积学及层序地层学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 问题的提出

层序地层学是在地震地层学基础上发展起来的一门边缘学科,研究的典型实例最早来自被动大陆边缘型海相盆地。层序是以不整合面或与之相对应的整合面为边界的一套成因上相关的、相对整合的、连续的地层序列^[1]。在早期的 Vail 层序地层模式中^[1],认为在海平面快速下降时期,特别对于 I 型层序或层序界面,主要形成下切谷,且大陆架上不接受沉积,因此,将层序界面定义在海平面变化的快速下降拐点,低位域是海平面快速下降期至初始缓慢上升期的产物。Posamentier 等^[2]针对海退作用机制对低位海退沉积进行了讨论,指出两种特定的方式可导致海退: 提供给海岸的沉积物输入量超过新增的可容空间量,即 $V_s / T > V_a / T$, 其中 T 表示时间, V_s 表示提供给海岸的沉积物体积, V_s / T 表示沉积物输入量, V_a 表示沉积物水下可容空间, V_a / T 表示可容空间变化率; 相对海平面下降。前者是由于沉积物输入量与新增可容空间的变化所致, Posamentier 称之为正常海退, 后者实际上是第一种情况的特例。在相对海平面下降期, V_a / T 是负值, V_s / T 将总是大于 V_a / T , 即使沉积物供给量为零, 这种关系仍成立并发生海退, Posamentier 称之为强制海退 (Forced regression), 并指出正常海退发生在相对海平面稳定和上升时期, 强制海退发生在相对海平面下

降时期。在此基础上,有的学者将 Vail 等所定义的低位或陆棚边缘体系域进一步分为两个体系域, Hunt 等^[3]称之为强制海退楔体系域 (FRWST) 和低位进积楔体系域 (LPWST), Nummedal 等^[4]称为下降体系域 (FSST) 和低位体系域。

实际上,在陆相湖盆中也同样存在湖退作用,即湖盆的岸线向湖心推进。一般情况下,湖盆边缘地区沉积物对水体深度变化反映灵敏,湖盆中心或沉降中心地区,由于水体深度大,沉积物对水深变化响应不明显。 $D_w = H_{Sub} + H_E - T_{Sed}$ 为湖盆沉积作用的基本方程^[5], 其中 H_{Sub} 为盆地基底在 T 时间内沉降幅度,基底下降 $H_{Sub} > 0$, 基底上升 $H_{Sub} < 0$; H_E 为沉积盆地在 T 时间内绝对湖平面变化,上升为正值,下降为负值; T_{Sed} 为沉积盆地内某点在 T 时间内沉积厚度; D_w 为该点的水体深度变化,水深增大 $D_w > 0$, 水深变小 $D_w < 0$ 。由该方程可知,当 $D_w < 0$, 水体深度减小,将发生湖退现象,岸线向盆地中心推进; $D_w > 0$, 水体深度增大,将发生湖进现象,岸线向岸推进。对于湖盆内某一点来说,在 T 沉积时间内,新增可容空间为 $D_w + T_{Sed}$ (也为相对湖平面变化量), 沉积物输入量为 T_{Sed} , 若沉积物输入量大于新增可容空间量,即 $T_{Sed} > D_w + T_{Sed}$, 也意味着 $D_w < 0$, 即发生湖退作用, 此时主要由于沉积物供给速率高于可容空间增加速率所致,称之为正常湖退作用。若湖盆中相对湖平面下降,即 $H_{RE} = H_{Sub} +$

$H_E = D_W + T_{Sed} < 0$,此时即使 $T_{Sed} = 0$,也存在 $D_W < 0$,肯定存在湖退作用,此时称之为强制湖退作用。

2 断陷湖盆中强制湖退沉积作用的特点

在强制湖退作用过程中,一般伴随着相对湖平面下降而形成一套进积沉积体,特别在单断湖盆的斜坡带、陆源碎屑供给充足时,表现得更加明显、特征。结合济阳拗陷古近系层序地层学研究,通过与正常湖退沉积作用的比较,系统总结了断陷湖盆中强制湖退沉积作用的特点。

2.1 形成时期和机制

正常湖退一般形成于湖平面相对稳定到缓慢下降时期,沉积物充填量高于同期的可容空间增加量,是形成正常湖退的关键因素。强制湖退一般出现在相对湖平面快速下降时期,由于相对湖平面下降,导致水下可容空间减小,湖盆岸线向盆地中心发生明显、快速迁移所致。沉积物充填不是引起强制湖退作用的关键因素,其仅仅起到加速湖退作用的规模和速度的作用。

2.2 沉积特征

当陆源碎屑物质供给充足时,正常湖退和强制湖退沉积期均可在盆地边缘地区形成滨浅湖三角洲沉积,但在两种类型湖退作用条件下,所形成的湖退三角洲沉积体的结构特征存在差异。

正常湖退沉积期三角洲沉积体的平原相发育,地震剖面上的顶积层反射清楚,常具“S形前积结构”,反映了岸线向湖盆中心推进速度较慢,平原相保存完整,总体上表现为加积到弱进积的沉积特征(图 1)。强制湖退三角洲沉积体的平原相不发育,地震剖面上常具有斜交前积反射结构(图 1、2)

2.3 与层序界面的关系

在一个理想的、完整的湖平面变化旋回中,一般正常湖退发生在强制湖退沉积之前,在垂向上具有上下叠置关系。强制湖退沉积体的顶界面为不整合面,实际上,强制湖退的发育过程也是不整合的形成过程,随着岸线向盆地中心推进,早期形成的强制湖退沉积体逐渐出露水面,处于无沉积,甚至遭受剥蚀的状态。根据层序的定义,层序界面应位于强制湖退沉积体之上,这点有别于传统海相层序地层中的层序界面位置。早期传统的 EXXON 石油公司的层序地层模式中,将层序界面放在海平面高位相对稳定与快速下降的拐点^[6],后来,虽然 Posamentier 提出了强制海退概念,但仍然认为层序界面代表了海平面下降的开始,将强制海退形成的低位滨线砂体之底作为层序界面^[2],即层序界面位于强制海退沉积体与正常海退沉积体之间。这显然与层序地层模式概念体系不连贯,层序内将出现更大规模的沉积间断或不整合(图 1)。因此,层序界面应位于强制湖退沉积体的顶面,只有当强制湖退沉积不发育或缺失,层序界面才有可能位于正常湖退沉积体的顶面。

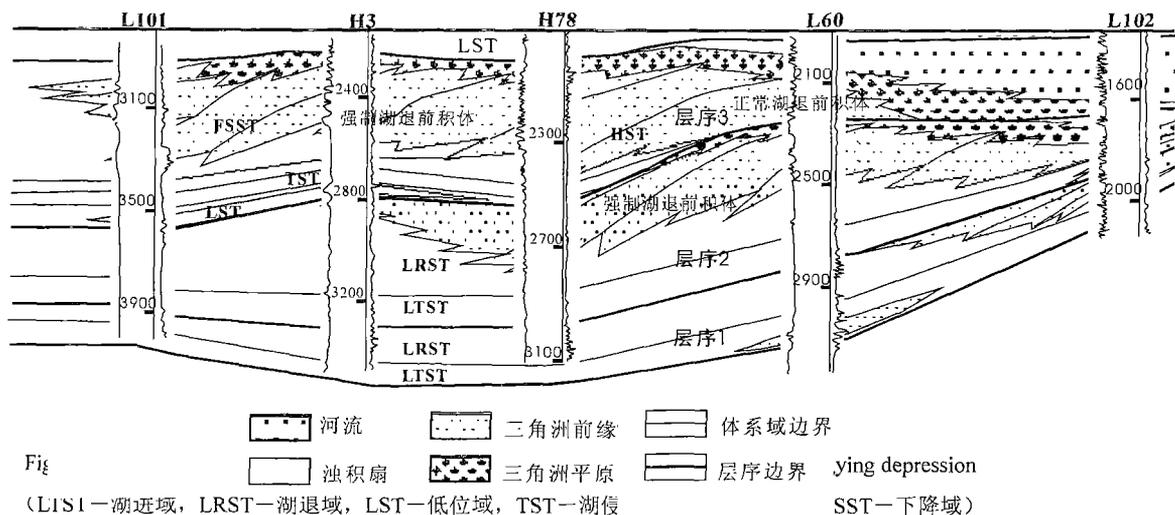


图 1 东营凹陷沙三段层序地层对比图

(LTST - 湖进域, LRST - 湖退域, LST - 低位域, TST - 湖侵域, HST - 高位域, FSST - 下降域)

Fig 1 Sequence stratigraphic correlation of the 3rd member of Shahejie formation in Dongying depression

2.4 强制湖退作用的沉积期,常伴随着下切谷的形成
 强制湖退沉积期,一般伴随着湖平面或基准面的大幅度下降,这种下降将导致由湖盆边缘流向盆地的河流下蚀(切)作用增强,形成深而窄的下切谷,下切

谷的底界面为层序界面(图 3)。在单断湖盆的斜坡带,下切谷可切穿强制湖退沉积体,向盆内输送陆源碎屑沉积物。正常湖退沉积期,由于河流的下蚀作用弱,一般较难以发育下切沟谷。

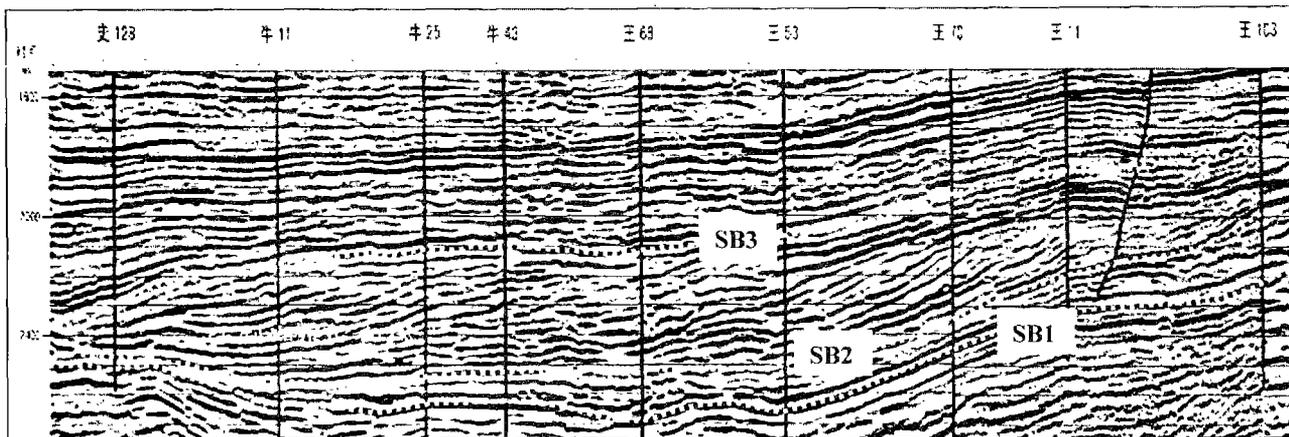


图 2 东营凹陷史 128—王 103测线层序地层解释

Fig 2 Sequence division of the 3rd member of Shahejie Formation of the measuring line from Well S128 to Well W103 in Dongying depression

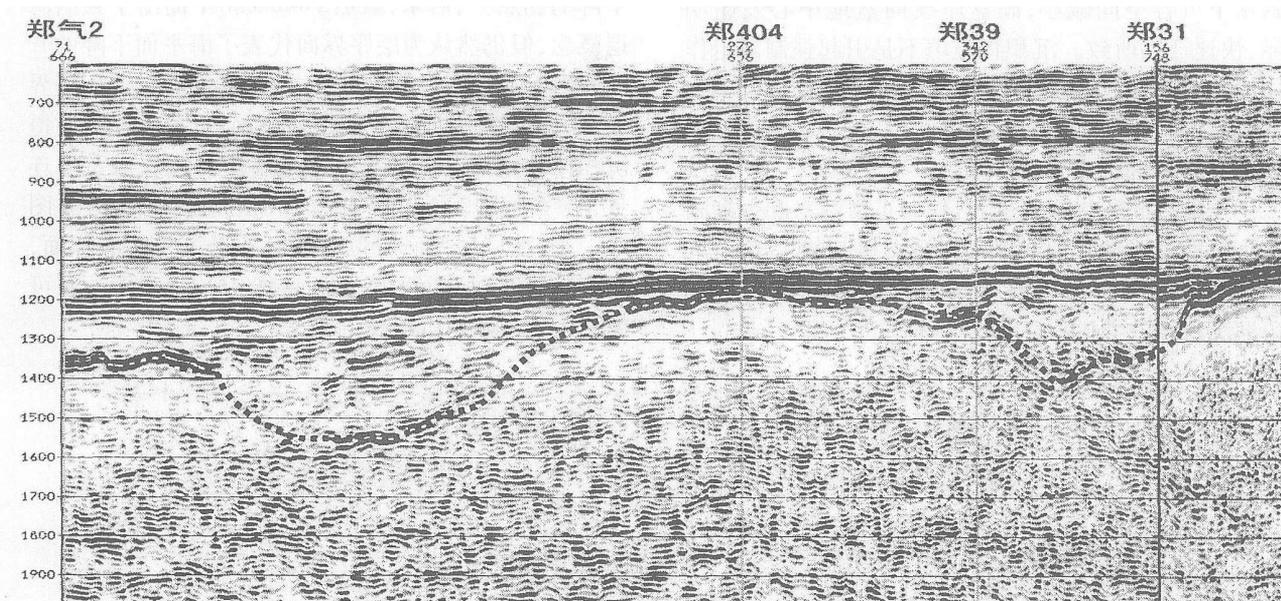


图 3 东营凹陷郑气 2—郑 31测线位于层序界面之上的下切谷

Fig 3 Incised valley above the sequence boundary of the measuring line from Well ZQ2 to Well Z31 in Dongying depression

3 断陷湖盆强制湖退作用的成因机制

相对湖平面下降是引起强制湖退的关键因素,即 $H_{RE} < 0$ 。根据沉积作用基本方程^[5]可知:

$$H_{RE} = H_{Sub} + H_E$$

$$H_{RE} < 0$$

因此, $H_{Sub} + H_E < 0$

满足此条件可能存在以下几种情况:

$H_{Sub} = 0, H_E < 0$,即湖盆基底不动,绝对湖平面下降;

$H_{Sub} < 0, H_E < 0$,即湖盆基底抬升,绝对湖平面也下降;

$H_{Sub} > 0, H_E < 0$,且 H_{Sub} 的绝对值小于 H_E 的绝对值,即湖盆基底下沉,绝对湖平面下降,但

绝对湖平面的下降幅度超过湖盆基底

的沉降幅度; $H_{Sub} < 0, H_E = 0$, 即湖盆基底抬升, 但绝对湖平面不变;

$H_{Sub} < 0, H_E > 0$, 且 H_{Sub} 的绝对值大于 H_E 的绝对值, 即湖盆基底抬升, 绝对湖平面也抬升, 但湖盆基底的抬升幅度超过绝对湖平面的抬升幅度。

对于内陆断陷湖盆来说, 一般构造运动控制了盆地基底的沉降或抬升, 幕式断陷活动将导致盆地基底的沉降, 区域性构造抬升将导致盆地基底的上升, 因此, 区域性构造抬升是引起 $H_{Sub} < 0$ 的关键因素。绝对湖平面的变化受气候、海侵、构造运动 (沉降和抬升)、沉积物等因素的影响, 其中仅气候、构造沉降可引起绝对湖平面下降即 $H_E < 0$ 。因此, 构造运动

(沉降或抬升)、气候是引起强制湖退的关键因素。

图 4 是单断陷湖盆中强制湖退形成机制的综合图解。

3.1 气候变化

当气候由潮湿变得干旱, 导致蒸发量增大, 若蒸发量小于或等于流入量时, 由于湖平面到达最低溢出口高程, 此时绝对湖平面无变化, 此时, 由于沉积物充填湖盆, 也导致沉积岸线向盆地中心推进, 属于正常湖退 (图 4A、B); 当蒸发量大于注入量时, 导致湖盆绝对湖平面下降, 若盆地基底保持稳定, 相对湖平面也发生下降, 岸线向盆地中心推进, 将引起强制性湖退 (图 4C), 即为上述的情况。

3.2 区域性构造抬升运动

构造抬升运动将导致湖盆基底抬升, 而湖盆最低

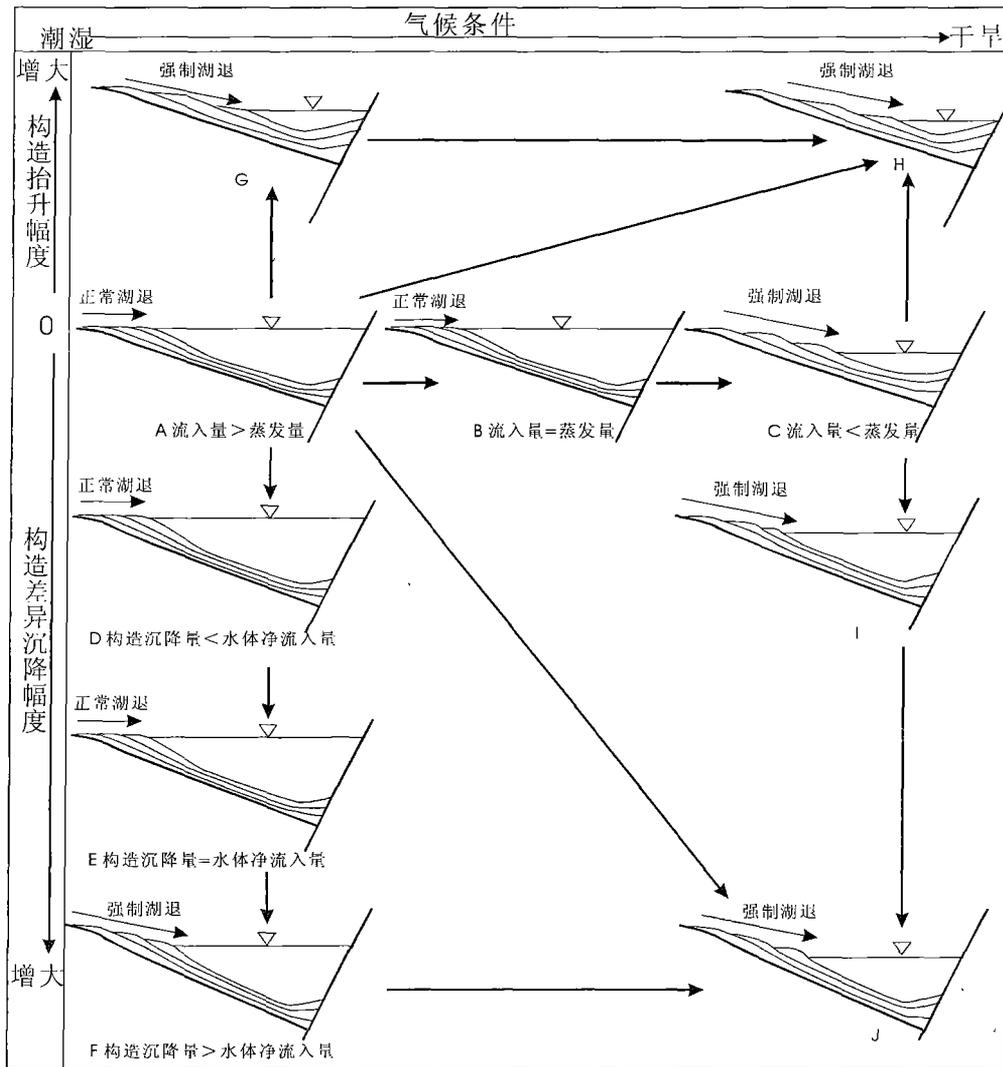


图 4 单断陷湖盆强制湖退形成机制的图解

Fig 4 The diagram showing forming mechanism of the forced lacustrine regression in the single faulted continental basins

溢出点高程不变,即绝对湖平面不变,此时湖盆具有敞流的性质,相对湖平面随着基底抬升而下降,水深也变浅,此时,即使沉积物厚度为零和气候为潮湿性,岸线也向盆地中心推进,将引起强制性湖退作用(图 4G),即为上述的情况。

3.3 构造差异沉降运动

在单断湖盆中,由控盆断层引起的拉张断陷运动是构造沉降的主要表现形式,且边界断层的活动多表现为构造掀斜运动^[7]。掀斜运动的特征是断层的下降盘(上盘)表现为差异沉降,靠近断层面附近的基底下陷幅度最大,向盆地缓坡边缘下降幅度减小^[8]。这种差异沉降运动,将导致湖盆内水体发生重新再分配,形成新生可容空间,且差异沉降强度控制了新生可容空间量,也控制了湖盆的湖平面和水深等参数的变化^[9]。边界断层所控制的差异沉降可产生新的可容空间,但由于断层的活动强度不同,差异沉降所产生新生可容空间量也不同,特别当新生可容空间量(V_a) > 外界水净流入量(V_w) + 沉积物充填量(V_s)时,将引起湖盆的绝对湖平面下降,即 $H_e < 0$ 。对于构造掀斜作用引起的差异沉降作用,一般在盆地的缓坡带外侧沉降幅度小,内侧沉降幅度大(图

5),且缓坡带外侧的沉降幅度多小于绝对湖平面下降量,此时,即使沉积物厚度为零,也将出现相对湖平面下降,湖盆岸线向盆地中心推进,发生强制性湖退作用。实际上,此时湖盆基底下沉,绝对湖平面也下降,但绝对湖平面下降幅度超过了基底下降幅度,相当于上述的情况。

在沉积盆地的沉积演化过程中,强制湖退的产生有时并非是某一单一因素作用的产物,而是多个因素综合作用的产物。如在发生区域性构造抬升的同时,气候也由潮湿向干旱转化(图 4H),属于上述、的情况,如东营凹陷沙三段沉积期的层序 3 晚期的强制湖退沉积体(图 1),是构造抬升和气候干旱化共同作用的产物。而东营凹陷沙三段沉积期的层序 2 晚期的强制湖退沉积体(图 1),是边界断层幕式沉降引起的盆地基底差异沉降的产物。东营凹陷沙三段沉积期,气候基本持续为潮湿气候条件,仅在沙三段沉积晚期气候才开始向干旱转化^[10],但凹陷的边界控盆断层具有幕式断陷活动的特点,因此,沙三段层序 1 和层序 2 的形成和演化主要受幕式断陷活动的控制,层序 3 是气候和构造活动综合作用的产物^[11]。

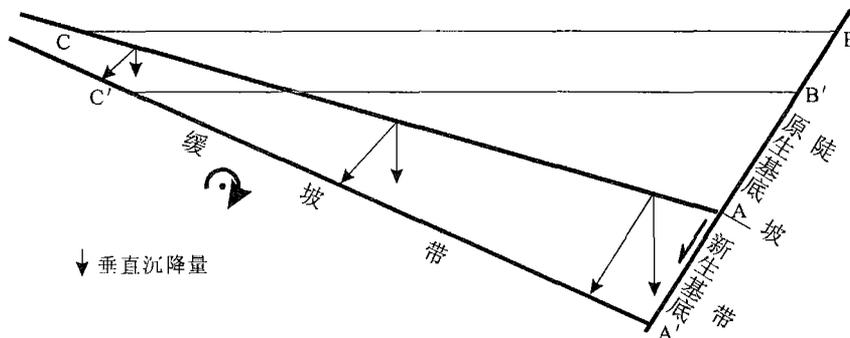


图 5 单断湖盆中构造掀斜作用对湖盆基底变化的影响

Fig 5 Effect of the episodic movement on the change of lacustrine basin basement

4 结束语

强制湖退沉积是层序演化过程中相对湖平面快速下降时期的产物,与层序演化中快速湖侵的沉积作用相对应,因此,在断陷湖盆中采用体系域的“四分法”更合理^[11~14],一个完整的层序由低位域(Lowstand systems tract,简称 LST)、湖侵域(Transgressive systems tract,简称 TST)、高位域(Highstand systems tract,简称 HST)和下降域(Falling stage systems tract,

简称 FSST)或湖退域(Regressive systems tract,简称 RST),强制湖退沉积对应于湖退域或下降域,强制湖退沉积发育于层序演化的晚期,层序界面位于湖退域和低位域之间。

强制湖退沉积期砂体发育,且沉积体的顶界面多为层序界面或不整合面,其上一般被湖侵泥岩覆盖,具有良好的圈闭条件,不整合面又可作为油气良好的运移通道,因此,强制湖退沉积体易形成不整合油气藏(图 6)。

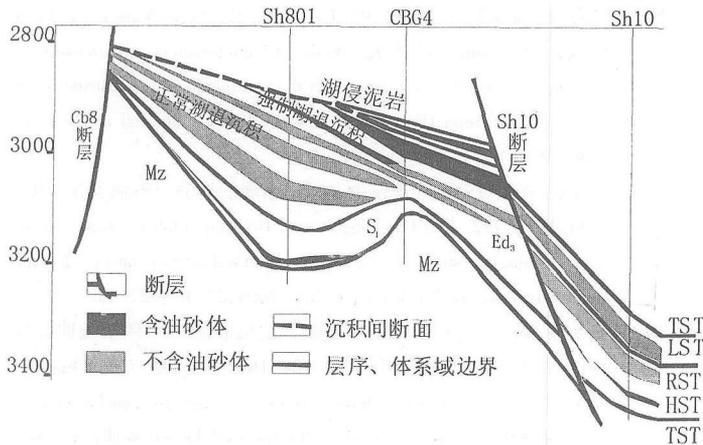


图 6 埕岛东斜坡地区东三段砂体分布及油藏剖面图 (TST - 湖侵域; LST - 低位域; HST - 高位域; RST - 湖退域)

Fig 6 The sandbody and reservoir section map of Dong3 member in the eastern slope area of Chengdao

强制湖退沉积是相对湖平面快速下降时期的产物,当沉积物供给充足时,在盆地斜坡边缘地区发育典型的前积式三角洲沉积,伴随着湖平面的下降,三角洲前缘沉积物往往不稳定,易导致前缘砂体发生滑塌,在前三三角洲地区形成滑塌浊积岩沉积(图 7)。

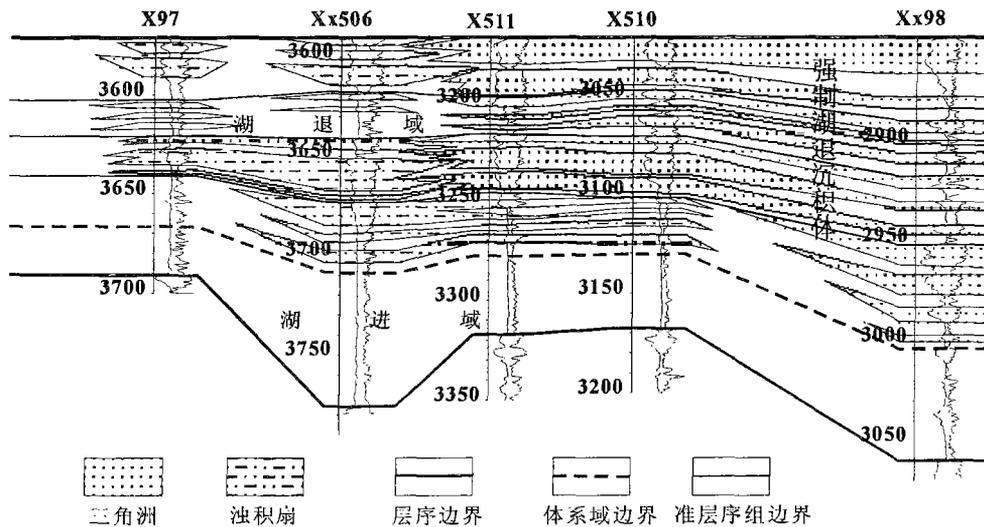


图 7 惠民江家店地区沙三下层序地层对比图

Fig 7 Sequence stratigraphic correlation of the 3rd member of Shahejie Formation in Jiangjiadian area

参考文献 (References)

- Vail P R. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy Part I seismic stratigraphy interpretation procedure. In: Bally A W, ed. Atlas of seismic stratigraphy. AAPG Bulletin, Studies in Geology, 1987, 27: 11~10
- Posamentier H W, Allen G P, James D P and Tesson M. Forced regressions in a sequence stratigraphic framework: concepts, examples and exploration significance. AAPG Bulletin, 1992, 76: 1687~1709
- Hunt D and Tucker M E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge system tracts: deposition during base-level fall. Sedimentary Geology, 1992, 81: 1~9
- Nummedal D. The falling sea level systems tract in ramp settings. Abstract Mesozoic of the Western Interior SEPM Theme Mtg, Ft Collins, CO. 1992
- 鹿洪友,操应长,姜在兴,等.断陷湖盆沉积作用的基本方程及其在层序地层学中的应用.石油勘探与开发,2003,30(3):19~22 [Lu Hongyou, Cao Yingchang, et al. Sedimental basic equation of rift lake basin and its application in sequence stratigraphy. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 19~22
- Van Wagoner J C, Mitchum R M, Campion K M and Rahmanian V D. Siliclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: Concepts for high-resolution correlation of time and facies. AAPG Methods in Exploration Series, 1990, 7: 55
- 刘震,曾宪斌,张万选.构造掀斜对单断湖盆湖平面变化的影响.沉

- 积学报, 1997, 15 (4): 64 ~ 65 [Liu Zhen, Zeng Xianfu and Zhang Wanxuan Effect of tectonic tilt of faulted blocks on lake level change of single faulted continental basins Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15 (4): 64 ~ 65]
- 8 胡受权. 泌阳断陷双河—赵凹地区下第三系核三段陆相层序发育的可容空间机制. 沉积学报, 1998, 16 (3): 102 ~ 108 [Hu Shouquan Accommodation mechanism of terrigenous sequence development in fault-depressed Lacustrine Basin Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16 (3): 102 ~ 108]
- 9 操应长, 姜在兴, 夏斌. 幕式差异沉降运动对断陷湖盆中湖平面和水深变化的影响. 石油实验地质, 2003, 25 (4): 323 ~ 327 [Cao Yingchang, Jiang Zaixing and Xia Bin Effect of episodic differential settling movement on lake level and water depth in the rift lacustrine basin. Petroleum Geology and Experiment, 2003, 25 (4): 323 ~ 327]
- 10 王秉海, 钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践. 山东东营: 石油大学出版社, 1992 [Wang Binhai and Qian Kai Geological study and exploration practice in Shengli Oilfield Dongying Shandong: Petroleum University Publishing House, 1992]
- 11 操应长, 姜在兴, 夏斌, 杨伟利. 陆相断陷湖盆 T - R 层序的特点及其形成机制——以渤海湾盆地东营凹陷下第三系沙三段层序地层为例. 地质科学, 2004, 39 (1): 111 ~ 122 [Cao Yingchang, Jiang Zaixing, Xia Bin and Yang Weili Characteristics and formational mechanism of the T - R sequence in the continental rift lacustrine basin for an example from Dongying depression. Chinese Journal of Geology, 2004, 39 (1): 111 ~ 122]
- 12 操应长. 断陷湖盆层序地层中下降体系域的划分. 石油大学学报, 2000, 24 (1): 22 ~ 25 [Cao Yingchang Division of falling stage systems tract of sequence strata in a continental rift-subsidence basin Journal of the University of Petroleum, China, 2000, 24 (1): 22 ~ 25]
- 13 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. 石油学报, 2000, 21 (1): 23 ~ 28 [Hu Shouquan, Guo Wenping, Yan Qibin, *et al* Discussion on systems tract four-division for a terrigenous sequence stratigraphy in fault-depressed lacustrine basin Acta Petrolei Sinica, 2000, 21 (1): 23 ~ 28]
- 14 郭彦如. 银额盆地查干断陷闭流湖盆层序类型与层序地层模式. 天然气地球科学, 2003, 14 (6): 448 ~ 452 [Guo Yanru Sequence Types and Sequence Stratigraphic Models of Chagan Fault-depressed Stagnant Lacustrine Depression, YN - E Basin Natural Gas Geoscience, 2003, 14 (6): 448 ~ 452]

Sedimentation and Its Forming Mechanism of the Forced Lacustrine Regression in the Rift Lacustrine Basin

CAO Ying-chang

(Faculty of Geo-Resource and Information, University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061)

Abstract The lacustrine regression caused by the falling of the relative lake-level in rift basin is called Forced Lacustrine Regression (FLR). Given the sediments supply in FLR period, the lacustrine regression action will be strengthened and, correspondingly, a set of foreset sandbodies with evidently oblique progradational configuration will be formed. The foreset sandbody usually absents the top set beds and shows an oblique progradational reflection configuration on the seismic profile. The top boundary of the foreset sandbody is corresponding to sequence boundary, and often develops incise valleys. Three forming mechanisms that give rise to the FLR can be concluded as climate change, structural uplift and basement differential subsidence in gentle slope caused by episodic movements of boundary faults. They can also lead to the falling of the relative lake-level in rift basin. The foreset sandbody formed in FLR period will be the favorable exploration target as a subtle reservoir due to its good forming conditions for reservoirs.

Key words forced regression, sequence stratigraphy, forming mechanism, rift lacustrine basin