

文章编号: 1000-0550 (2005) 04-0631-08

陆相湖盆古地形、可容空间的体积变化率 与层序结构的关系

纪友亮¹ 张善文² 冯建辉³

1 (同济大学海洋与地球科学学院 上海 200092) 2 (中国石油化工股份公司胜利油田分公司 山东东营 257061)

3 (中国石油化工股份公司中原油田分公司 河南濮阳 457001)

摘要 通过对东营凹陷和东濮凹陷的层序结构的差异进行了对比,并对东营凹陷和东濮凹陷的体积和地形进行了分析,认为陆相湖盆古地形、可容空间变化与总可容空间的比值(可容空间的体积变化率)与层序结构有密切关系。沙三段沉积期,东营凹陷三级湖平面变化引起的可容空间的体积变化率与东濮凹陷四级湖平面变化引起的可容空间的体积变化率相近。东营凹陷沙三段沉积时期盆地体积大、地形陡,层序的发育主要受三级湖平面变化的控制,因此层序厚度大,层序内部砂体厚度大,分布相对集中。而东濮凹陷沙三段沉积时期,盆地体积小,地形较缓,层序的发育主要受四级湖平面变化的控制,因此层序厚度小,层序内部砂体厚度小,分布广,不稳定。

关键词 湖平面变化 层序 可容空间 体积变化率

第一作者简介 纪友亮 男 1964 年出生 教授 博士生导师 石油地质学、沉积学和层序地层学

中图分类号 P539.2 **文献标识码** A

1 导论

层序地层学研究,不仅要进行地层的等时性划分与对比,更重要的是建立层序地层学模式,预测砂体和储层的分布,这是层序地层学研究的关键。渤海湾盆地各凹陷层序地层的发育特征差异很大,如东营凹陷沙三段沉积时期,层序厚度大,数量少,地震剖面显示高位域前积层发育,岩性剖面上砂体和泥岩的厚度大,且集中分布,岩盐沉积不发育。而与之相临的东濮凹陷三段沉积时期,层序厚度小,数量多,地震同相轴多为平行反射,岩性剖面上砂体和泥岩的厚度薄,构成频繁薄互层,岩盐沉积发育。这种现象与两凹陷的构造特征和古地形和盆地的体积有明显的关系。

2 东营凹陷和东濮凹陷沙三段层序划分及其特征

2.1 东营凹陷沙三段层序划分及其特征

以东营凹陷沙三段可以划分为三个层序,从时间上来讲,这三个层序沉积所需时间较长,约 1 Ma,属于 3 级层序。从图 1A 中可以看出,第 3 层序厚度

为 460 m,低位体系域主要由浊积扇组成,厚度 60 m,湖侵体系域主要由暗色湖相泥岩组成,厚度 150 m,高位体系域由 2 个进积式准层序组构成,厚度 250 m。从剖面上看为大段砂岩与大段暗色泥岩互层,单砂层厚度较大,5~10 m 之间。

从地震剖面上看,沙三段的地震反射前积层很发育^[1],层序边界处的不整合面明显。从其地质解释剖面图(图 2)上可以看出,东营凹陷沙三段所发育的每个层序由老至新,依次向西迁移,沉积中心也往西迁移。从湖底到层序界面的距离(水深)较大,湖平面较高,约 100~200 m。每个层序的厚度较大,约 100~460 m。

2.2 东濮凹陷沙三段的层序划分及其特征

以东濮凹陷马 7 井为例,沙三段可以划分为 11 个层序,这些层序较薄,沉积所需时间较短,约 0.3 Ma,属于 4 级层序。从图 1B 中可以看出,剖面由频繁的砂泥岩薄互层构成,第 1~3 四级层序,每个层序厚度为 50 m 左右,低位体系域主要由岩盐组成,厚度 10 m 左右,湖侵体系域主要由暗色湖相泥岩组成,厚度 20 m,高位体系域由 1~2 个进积式准层序组构成,厚度 20~30 m。单砂层厚度较小,1~2 m 之间。

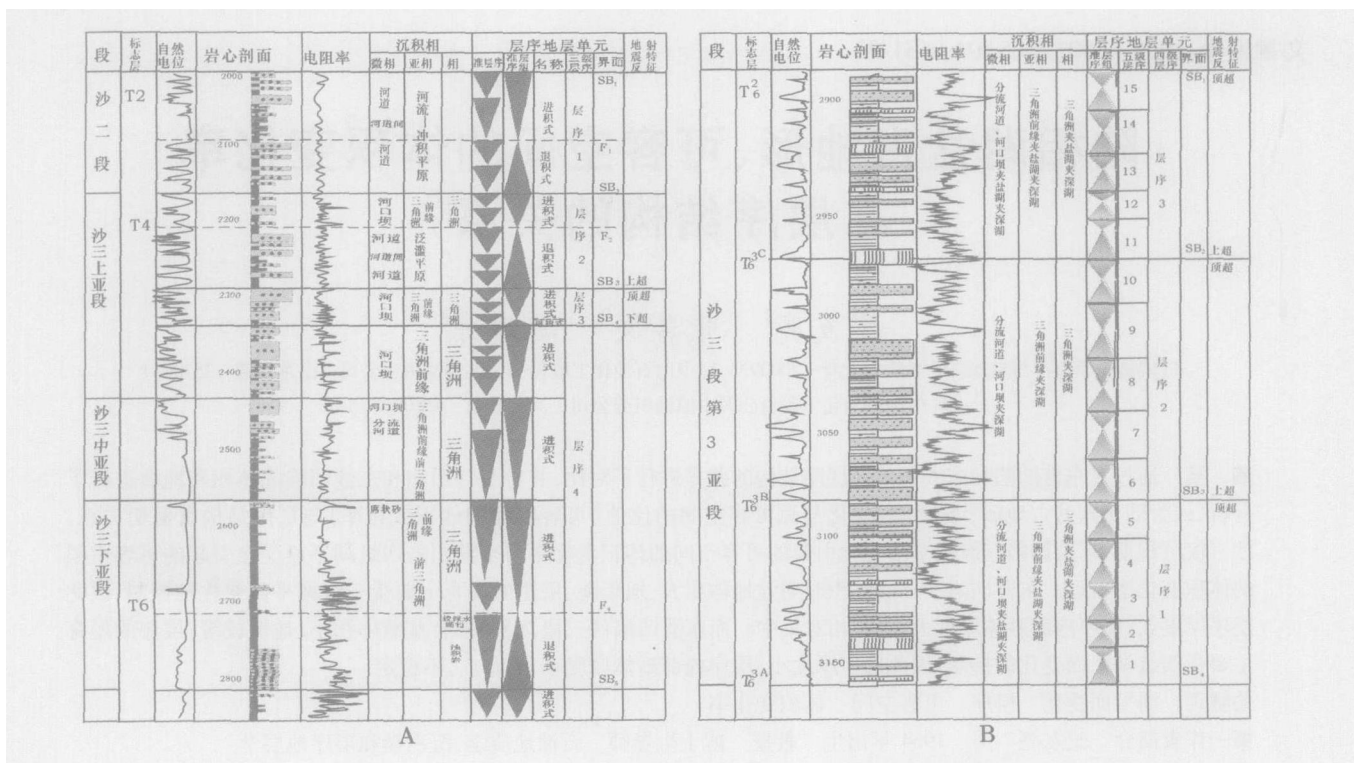


图 1 东营凹陷沙三段(A)和东濮凹陷沙三 3 亚段层序结构特点

Fig 1 The character of sequence structure of third member of Shahejie Formation in Dongying depression (A) and third submember third member of Shahejie Formation in Dongpu depression (B)

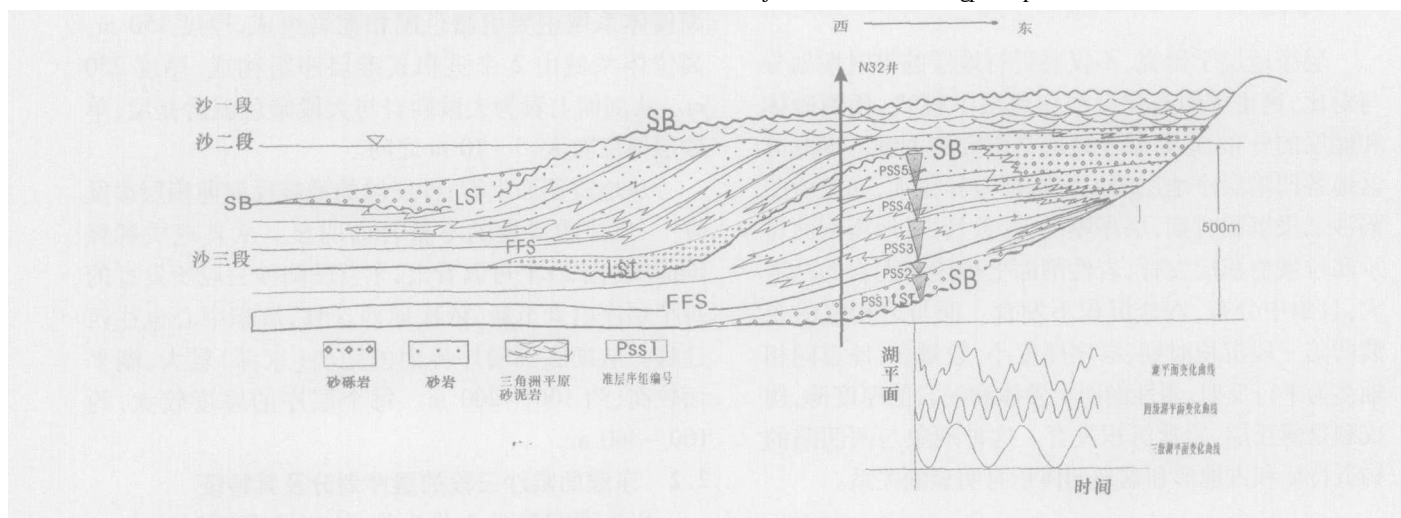


图 2 东营凹陷沙三段层序结构模式 (地震剖面的地质解释)

Fig 2 The sequence models of third member of Shahejie Formation in Dongying depression (Geologic explanation of Seismic profile)

从地震剖面上看,沙三段的地震反射前积层不发育^[2],三级层序边界处的削截和顶超特征不清楚。图 4 为根据地震反射特点和地层对比剖面建立起来的层序发育模式,从剖面图(图 4)上可以看出,东濮凹陷沙三段的每个 4 级层序较薄,沉积中心为岩盐沉积,从湖底到层序界面的距离(水深)较小,湖平面较

低,约 30 ~ 50m。每个层序的厚度较小,约 30 ~ 50 m。

从以上资料可以看出,这两个凹陷下第三系的层序发育模式和砂体的分布情况相差很大。东营凹陷单砂体厚度大,平面上分布相对集中,而东营凹陷单砂体厚度薄,平面上分布很广。

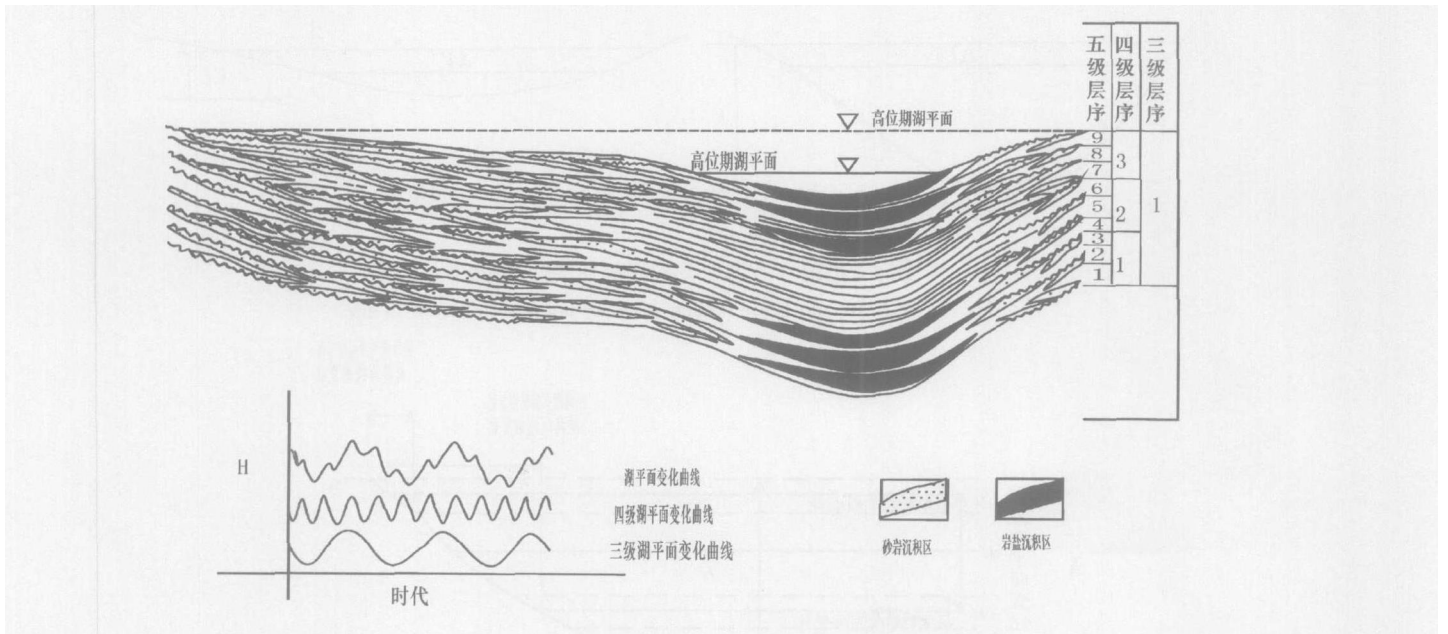


图 3 东濮凹陷沙三段层序结构模式 (东濮凹陷高频湖平面变化产生的层序结构剖面模式图)

Fig 3 Sequence structure models of third member of Shahejie Formation in Dongpu depression (Sequence structure models profile created by high frequency lake level change in Dongpu Depression)

3 两种层序结构的成因分析

以往讨论层序结构的影响因素的时候,往往讨论沉积物供应速率与可容空间变化速率(可容空间的时间变化率)之间的关系,当沉积物供应速率大于可容空间变化速率时,形成进积式准层序组(高位体系域),当沉积物供应速率等于可容空间变化速率时,形成加积式准层序组(高位体系域),当沉积物供应速率小于可容空间变化速率时,形成退积式准层序组(湖侵体系域)。基准面下降的时候形成层序边界,盆地类型和地形,决定着层序的结构。

实际上盆地的地形和可容空间的体积变化率对层序的结构也有很重要的影响,相同时间内,可容空间的体积变化率不同,会形成不同结构的层序。

3.1 可容空间体积变化率的定义

可容空间体积变化率可用下式表示:

$$A = V/V \tag{1}$$

$$V = S \times h \tag{2}$$

式中:A—可容空间体积变化率; V—可容空间体积的变化量; V—盆地的可容空间; S—盆地面积; h—湖平面的变化。

在同一地区,气候条件是相同的,气候的变化造成的湖平面的变化(h)是相同的,在湖盆面积相差不大的情况下,造成的可容空间的变化 V 是近似

的,但是由于盆地可容空间(V)相差很大,引起的可容空间体积的变化率(V/V)可以相差很大。

但在大湖盆中(图 4A,图 5,图 6B),湖盆体积大,湖水体积大,湖平面高度大(湖底到湖平面的距离),同时地形也较陡。

较高频湖平面变化引起的可容空间的体积变化率(V/V)较小,由于大湖盆的地形较陡,在四级湖平面下降旋回,引起的湖岸线向湖盆方向很短距离迁移,产生的剥蚀区域小,不足以形成层序边界,只发育准层序组或准层序边界。湖岸线相对稳定,沉积物稳定地向湖盆方向进积和加积,形成厚度较大,分布稳定的储层。

较低频湖平面的变化引起的可容空间的体积变化率(V/V)比四级湖平面的变化引起的可容空间的体积变化率大的多,在湖平面下降旋回,引起的湖岸线向湖盆方向长距离迁移,产生的剥蚀区域广,剥蚀时间长,提供的碎屑物质多,产生的低位体系域厚度大。一个三级湖平面的变化旋回形成的层序的厚度也大。

在近似面积的位置相邻小湖盆中(图 4B,图 6A,图 7),在相同的气候条件下,同一频率的湖平面变化引起的 h 是近似的,但湖平面高度小(湖底到湖平面的距离),湖水体积(V)小,高频湖平面的变化引起的可容空间的体积变化率(V/V或 h/h)可以与大

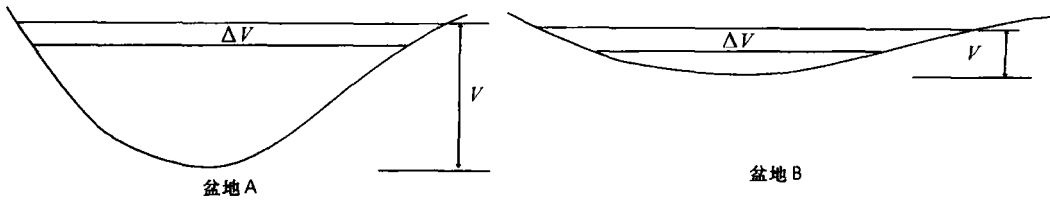


图 4 盆地 A 和盆地 B 面积相当, 体积相差很大

Fig 4 Basin A and B are similar in area, but very different in size

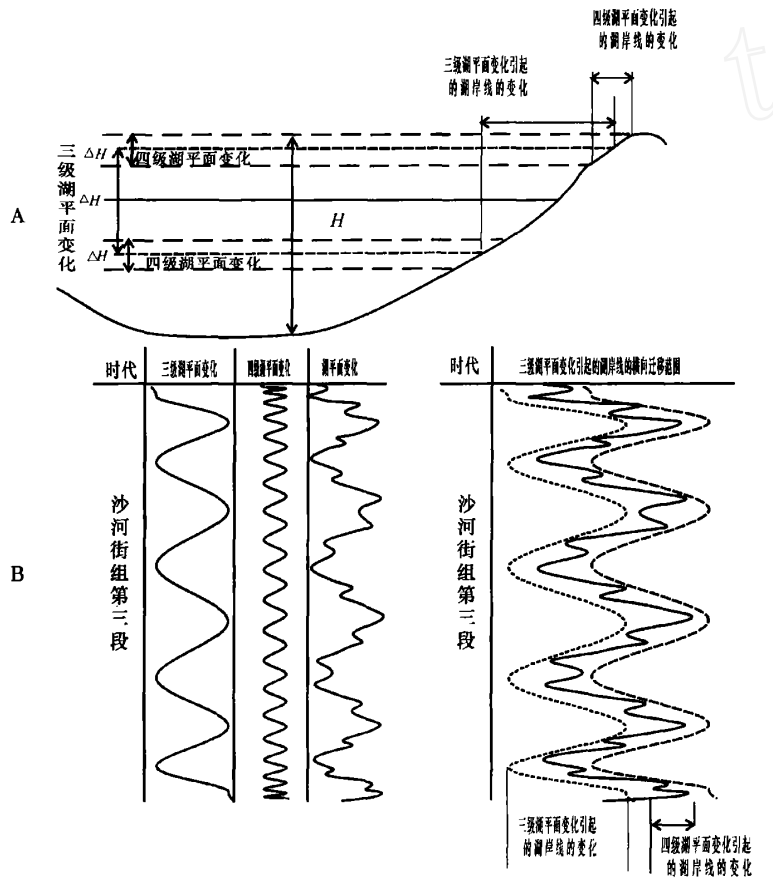


图 5 东营凹陷盆地结构、湖平面变化与湖岸线变化之间的关系

Fig 5 The structure of Dongying depression, lake level change and shoreline shifting

体积湖盆中低频的湖平面的变化引起的可容空间的体积变化率 ($V/V = h/h$) 相当, 也较大。由于小湖盆地形比较平缓, 在较高频的湖平面下降旋回, 就可以引起湖岸线向湖盆方向长距离迁移, 产生的剥蚀区域广, 但剥蚀时间短, 提供的碎屑物质少, 产生的较高频层序低位体系域厚度小。由于较高频湖平面变化引起的湖岸线的迁移快, 相对不稳定, 使得沉积物没有足够的时间稳定地向湖盆方向进积和加积, 所以形成

的储层厚度小, 垂向上出现的频率高, 横向上分布广, 但不稳定。

同时, 在小湖盆中, 较高频湖平面变化引起的可容空间的体积变化率 (V/V) 可以很大, 但由于盆地总体积 V 太小, 使较低频湖平面变化在小盆地中没有表演的舞台, 对湖岸线迁移的影响表现不出来, 因此, 由较低频和较高频湖平面下降旋回, 引起的湖岸线向湖盆方向的迁移距离差不多, 使较高频湖平面变

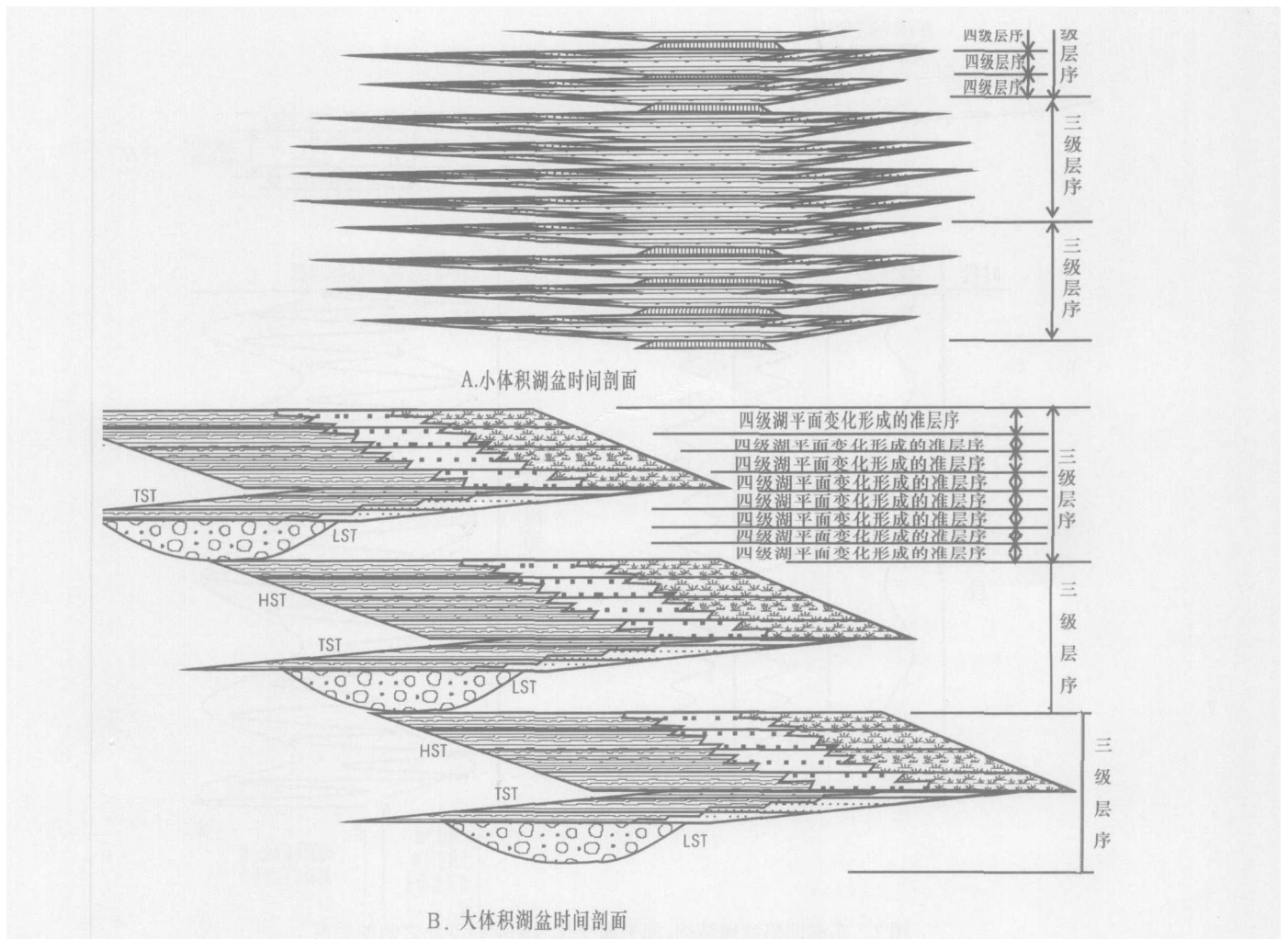


图 6 小体积盆地和大体积盆地形成的层序的时间剖面

Fig 6 The time profile of sequence in big basin and small basin

化对层序结构的影响把较低频湖平面变化对层序结构的影响掩盖掉了。

当 v = 较高频的 v 或 h = 较高频 h 时, 则较低频湖平面变化对层序结构的影响完全消失。

3.2 东营凹陷沙三段沉积时期的可容空间变化率与层序结构

根据地震剖面的解释, 东营凹陷沙三段沉积时期, 盆地为深盆, 可容空间大, 水体深度大, 根据地震剖面前积反射层底积层和顶积层的垂向距离, 计算出水体深度可达 200 m, 盆地边缘地形陡, 气候变化引起的 4 级湖平面变化, 对湖盆岸线的变化影响不大, 岸线的向湖盆方向的退缩与沉积物的不断进积有关, 因此 4 级湖平面变化期间, 岸线相对稳定。但是 3 级湖平面变化, 对湖盆岸线的变化影响较大, 每个三级层序的沉积厚度也大, 层序顶界面的顶超现象和底界

面的上超现象明显。另外由于水体体积大, 高频气候变化引起的蒸发量的相对比例较小, 很难达到岩盐沉积所需的湖水浓度, 所以东营凹陷没有岩盐沉积。同样气候变化引起的 4 级湖平面变化引起的可容空间变化率比较小, 在湖盆深水区留下的沉积记录不明显。

3.3 东濮凹陷沙三段沉积时期的可容空间变化率与层序结构

从地震剖面及其层序的解释可以看出, 东濮凹陷沙三段沉积时期, 盆地为浅盆, 平盆, 可容空间小, 地形平坦, 水体深度小, 高频 (四级以上) 气候变化引起的湖平面变化, 对湖盆岸线的变化影响很大, 岸线的迁移与高频气候变化有密切关系, 因此岸线很不稳定, 导致每个层序的沉积厚度小, 薄砂体发育。低位期的薄砂体直接与高位期的暗色泥岩叠置在一起。另外由于水体体积小, 气候变化引起的蒸发量的相对

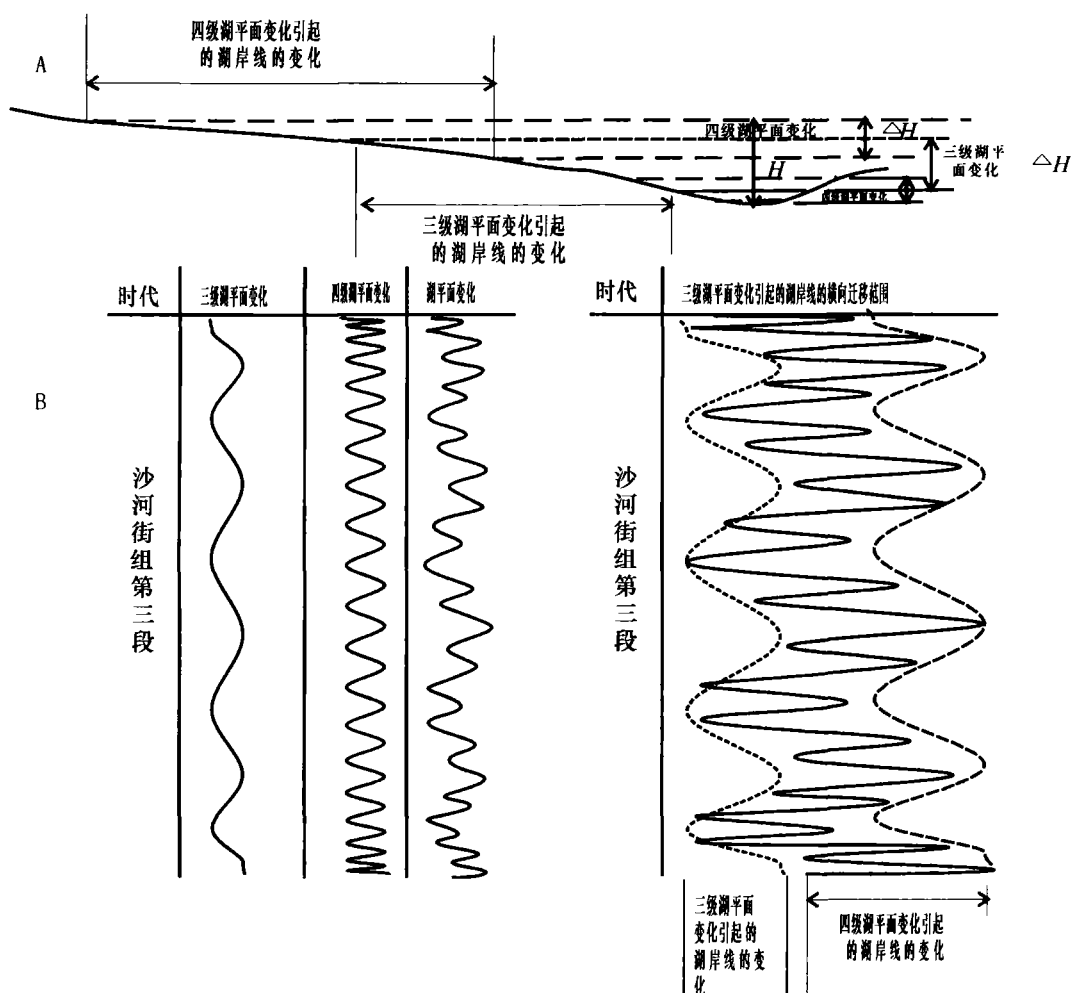


图 7 东濮凹陷盆地结构、湖平面变化与湖岸线变化之间的关系

Fig 7 The structure of Dongpu depression, lake level change and shoreline shifting

相对较大,很容易达到岩盐沉积所需的湖水浓度,所以东营凹陷有岩盐沉积。

东濮凹陷沙三段沉积时间约 5 Ma,岩盐的累计厚度可达 500 m,若平均单层盐岩的厚度按 10 cm 计算,则共发育约 5000 层单岩层。因每一单层盐岩的沉积代表一次湖平面的下降,则沙三段湖平面的变化频率达到 1000 次/Ma^[3~8]。

由于四级湖平面的变化可以形成明显的层序边界,一个四级的结构与东营凹陷三级层序的结构类似,只是厚度和规模小的多。东濮凹陷三级层序的形成也受气候控制,但由于湖盆体积小,三级湖平面变化得不到很好的体现,因此三级层序界面与四级层序边界的特征区别不明显,只是三级层序低位域内的四级层序与三级层序高位域内四级层序相比,其分布范围稍微小一些,沉积特征所反映的水体深度度也稍微浅一些,盐岩层的含量多一些(图 3,图 6)。

3.3.1 湖岸线的迁移

湖岸线的横向迁移幅度,取决于古地形和湖平面的下降幅度。从东濮凹陷沙三段地层厚度分布特点^[3]和东濮凹陷地震反射几乎平行,没有前积反射结构特征来看,沙三段沉积时期古地形比较平坦。在平坦的古地形背景下,湖平面的垂向变化,可以引起湖岸线横向上大幅度迁移。因此东濮凹陷沙三段沉积时期,岩盐沉积时期的湖岸线与正常湖岸线相距较远(图 8)。

表 1 列出了东濮、东营凹陷沙三段沉积时期体积参数表,从表 1 中可以看出,东营凹陷由三级湖平面变化引起的可容空间的变化率与东濮凹陷由四级湖平面变化引起的可容空间的变化率相似。由于盆地的面积相同, V 可由 h (湖平面变化) 来反映, h 可根据地震反射结构、沉积特征、古生物特征来判断^[9]。

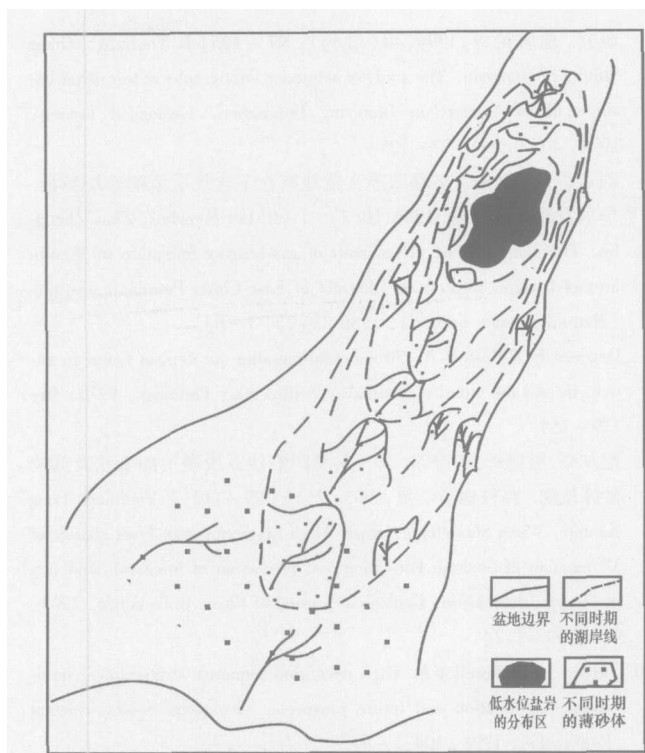


图 8 东濮凹陷薄砂体沉积模式

Fig 8 Thin sandbody depositional model of Dongpu depression

表 1 东濮、东营凹陷沙三段沉积时期体积参数表

Table 1 The volume factor of Dongying and Dongpu Basin during the sedimentation of the third member

凹陷名称	面积 /km ²	平均最大 湖水深 /m	平均最小 湖水深 /m	可容空间 V /km ³	V /km ³	V/V
东营凹陷	6000	200	100	1200	600	1/2
东濮凹陷	5700	50	20	285	150	1/2
备注	100 m 为三级湖平面变化, 25 ~ 30m 为四级湖平面变化					

3.3.2 高频湖平面变化与低位砂体发育模式

由于湖平面变化频繁,湖岸线的不断迁移,形成的低位砂体分布比较广,但也正是由于湖平面变化频繁,使得低位期的沉积时间短,低位域砂体得不到充分发育,因此低位砂体很薄。形成东濮凹陷沙三段高位期的暗色泥岩与低位期的砂岩薄互层的特点。

在湖水位的上升期及高位期,各种碎屑岩体(三角洲、扇三角洲或滩坝砂体)在盆地边缘沉积,随着气候的干旱及湖平面下降,水位降低,进入低位期,此时湖泊缩小,早期沉积物遭受剥蚀、搬运和再沉积,在湖岸线退缩过程中,形成一系列进积砂体(图 8)。因此在盆地中的主要物源方向上,在由同生断层活动或构造挠曲形成的陡坡部位,会形成较厚的低位砂体。当湖水浓缩到一定程度,在盆地沉积中心形成盐岩(图 8)。因此,在主要物源方向上,由断层活动或构

造挠曲形成的二台阶处,如濮城、胡状集断层下降盘等地,是寻找低位砂体和岩性圈闭的有利部位^[3-8]。

3.3.3 湖平面变化成因分析

可容空间的变化是由相对湖平面变化引起的,而相对湖平面变化是由构造沉降和气候变化引起的。东营凹陷沙三段沉积早期盆地基底强烈沉降,产生大的可容空间,之后构造沉降速率很缓慢(简单断坳盆地)^[5],盆地被水充满后,相对湖平面变化主要由气候控制,沉积层序的形成过程也是在三级和四级湖平面的控制下沉积物对早期形盆地可容空间的充填过程,由于盆地可容空间大,只有三级湖平面变化湖岸线才能明显的向盆地中心迁移,三级层序有低位体系域、湖侵体系域和高位体系域,四级湖平面变化形成准层序(图 7B)。

东濮凹陷沙三段沉积早期盆地基底沉降不强烈,产生的可容空间也不大,之后构造沉降速率基本上是匀速的(同生断坳盆地)^[5,9],由于盆地可容空间产生的同时,被沉积物不断的充填,盆地可容空间一直变化不大,此时水下可容空间的变化(相对湖平面变化)也主要由气候控制,沉积层序的形成过程也是在三级和四级湖平面的控制下沉积物对早期盆地可容空间的充填过程,但由于盆地可容空间小,四级湖平面变化就能使湖岸线明显的向盆地中心迁移,三级湖平面变化表现空间不够,因此在沉积上表现不明显,三级层序表现为四级层序的垂向叠加(图 7A)。

4 结束语

陆相湖盆古地形、可容空间变化与总可容空间的比值(可容空间的体积变化率)与层序结构的有密切关系。

沙三段沉积期,东营凹陷三级湖平面变化引起的引起的可容空间的体积变化率与东濮凹陷四级湖平面变化引起的可容空间的体积变化率相近。东营凹陷沙三段沉积时期盆地体积大,地形陡,层序的发育主要受三级湖平面变化的控制,因此层序厚度大,层序内部砂体厚度大,分布相对集中。而东濮凹陷沙三段沉积时期,盆地体积小,地形较缓,层序的发育主要受四级湖平面变化的控制,因此层序厚度小,层序内部砂体厚度小,分布广,不稳定。

致谢 在完成该项研究的过程中,自始至终得到中原油田勘探开发研究院综合室,分析化验室的科技工作者的支持,得到石油大学(华东)资源学院有关教师及实验人员的支持,在此表示感谢。

参考文献 (References)

- 1 蔡希源,李思田,等. 陆相盆地高精度层序地层学(一).北京:地质出版社,2004.5,47,156~157 [Cai Xiyuan, Li Sitian, *et al* High Resolution Sequence Stratigraphy in Lacustrine Basin(1). Beijing: Geological Publishing House, 2004.5,47,156~157]
- 2 蔡希源,郑和荣,等. 陆相盆地高精度层序地层学(三).北京:地质出版社,2004.5,131 [Cai Xiyuan Zheng Herong, *et al* High Resolution Sequence Stratigraphy in Lacustrine Basin(3). Beijing: Geological Publishing House, 2004.5,131]
- 3 陈发亮,姜在兴. 东濮凹陷下第三系沙河街组层序地层划分及岩盐成因探讨. 沉积学报,2000,18(3):384~388 [Chen Faliang, Jiang Zaixing The study of sequence stratigraphy and the origin of halite of Shahejie Formation of lower Tertiary in Dongpu Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3):384~388]
- 4 金强,黄醒汉. 东濮凹陷下第三系深水成盐模式,华东石油学院学报(自然科学版),1985,9(1):1~14 [Jin Qiang, Huang Xinghan The deep water environment sedimentation model of salt of lower Tertiary in Dongpu Depression. *Journal of East China Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 1985,9(1):1~14]
- 5 纪友亮,张世奇. 陆相断陷湖盆层序地层学.北京:石油工业出版社,1996.12 [Ji Youliang, Zhang Shiqi The Sequence Stratigraphy of Terrestrial Rift Lacustrine Basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.12]
- 6 纪友亮,张世奇,李红南. 东营凹陷下第三系陆相盆地层序地层学研究. 地质论评,1994,40(增刊):97~105 [Ji Youliang, Zhang Shiqi, Li Hongnan The study of sequence stratigraphy of terrestrial basin of lower Tertiary in Dongying Depression. *Geological Review*, 1994, 40(Supp):97~105]
- 7 刘孟慧,赵激林. 东濮凹陷文留地区盐下含气层系的储层特征. 华东石油学院学报,1986,10(2):1~6 [Liu Menghui, Zhao Zhenglin The characteristic of reservoir of gas-bearing formation in Wenliu area of Dongpu Depression. *Journal of East China Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 1986,10(2):1~6]
- 8 Degenes E T, Ross D A. Stratabound metallic ore deposit found in active rift and the vicinity. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1976, 46:129~154
- 9 纪友亮,冯建辉,王声郎,等. 东濮凹陷沙三段湖平面变化及低位砂体预测. 高校地质学报,2003,9(1):99~112 [Ji Youliang, Feng Jianhui, Wang Shengliang, *et al* High frequency lake level change of 3rd member of Shahejie Formation and prediction of lowstand sandbody in Dongpu depression. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(1):99~112]
- 10 Aiken J F, Howell J A. High resolution sequence stratigraphy: innovation, application and future prospects. *Geological Society Special Publication*, 1998, 104:1~9
- 11 Carnol A R, and Bohacs K M. Stratigraphy classification of ancient lakes: balancing tectonic and climatic controls. *Journal of sedimentary Petrology*, 1999, 66:56~75

Relationship between Paleotopography and Volumetric Change Rate of Lacustrine Basin to the Sequence Structure

JI You-liang¹ ZHANG Shan-wen² FENG Jian-hui³

1(Department of Geology and Geophysics, Tongji University, Shanghai 200092) 2(Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying Shandong 257061) 3(Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang Henan 457001)

Abstract Through the comparison of the difference of sequence structure in Dongying depression and Dongpu depression, and the analysis of basin volume and topography of Dongying depression and Dongpu depression, it is considered that the paleotopography of basin, the ratio of the accommodation added to the total accommodation are nearly related to the sequence structure. During the sedimentation of the third member of Shahejie Formation, the variation rate of accommodation added and created by the third order cycle lake level fluctuation in Denying depression are nearly equal to the variation rate of accommodation added and created by the fourth order cycle lake level fluctuation in Dongpu depression. During the sedimentation of third member of Shahejie Formation, the basin volume of Dongying depression is very large and the slope is very steep, and the development of sequence is controlled by third order cycle lake level change, so the sequence is very thick. The sandbody thickness in the sequence is also big, and its distribution is very concentrative. During the sedimentation of the third member of Shahejie Formation, the basin volume of Dongpu depression is very small, the topography is very gentle, and the development of sequence is controlled by fourth order cycle lake level change, so the thickness of its sequence is small, and the sandbody thickness in the sequence is small too. Its distribution is very wide and is not stable.

Key words lake level change, sequence, accommodation, accommodation variation rate