

可容纳空间概念在陆相断陷盆地层序分析中的应用 —以渤海湾盆地地下第三系为例

池英柳

(中国石油天然气集团公司石油勘探开发科学研究院地质所 北京 100083)

摘要 以渤海湾盆地地下第三系为例,将可容纳空间概念应用于陆相断陷盆地层序成因分析和层序划分。陆相断陷盆地层序、准层序组和准层序的发育过程和基本特征,可分别根据二级、三级和四级幕构造沉降过程中新增可容纳空间与同期沉积物供给体积的对比关系解释。层序边界和体系域分界面的形成条件亦可通过分析可容纳空间变化加以描述和认识。由可容纳空间演变特点分析,引出了一个新概念——可容纳空间转换面,并用于识别层序边界和体系域分界面。

关键词 可容纳空间 层序成因 可容纳空间转换面 层序划分 陆相断陷盆地
作者简介 池英柳 男 35岁 博士后 高级工程师 石油地质学和层序地层学

自1985年 Jervy 在美国 SEPM 组织的“海平面变化—综合研究方法”会议上提出可容纳空间 (accommodation) 概念^[1]之后,可容纳空间这一术语在层序地层学文献中大量出现。根据可容纳空间变化,分析层序发育特征,是层序地层学的重要研究方法之一。本文以渤海湾盆地地下第三系为例,着重论述可容纳空间概念在陆相断陷盆地层序成因分析和层序划分中的应用,目的在于加深了解陆相断陷盆地层序的形成机制和探讨层序划分的新方法。

1 可容纳空间的概念

可容纳空间与基准面是一对相关联的概念。可容纳空间指(基准面之下)“可供沉积物堆积的潜在空间”^[1]。基准面是一个想象(imaginary)的动态平衡面,用于描述沉积作用的上限和侵蚀作用的下限^[2]。高于基准面表现为侵蚀作用,即使有沉积作用也是局部和暂时的,沉积物质点不稳定,不能长期保存下来而成为地层记录;低于基准面,发生沉积作用,沉积物有可能被埋藏而保存下来。

陆相断陷盆地作为地表的局限洼地,河流沉积平衡面即是其沉积基准面。河流沉积平衡面指河流搬运能力与物源区供给的沉积物总量之间恰好达到平衡状态时,形成顺水流方向上逐渐递降的地形^[3]。沉积物堆积到平衡面时,其纵切面上各点的

连线理论上是一条抛物线,向物源方向逐渐变陡,向盆地出口方向变缓(图1)。渤海湾盆地以凹陷为相对独立的沉积单元,其泄水口通常在长轴方向上(为了作图方便,图1表示在短轴方向上),平衡面的下游端点高程与泄水口一致。

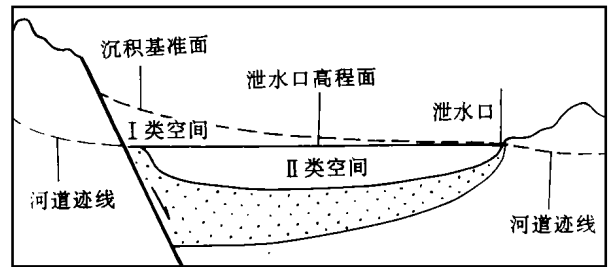


图1 陆相断陷盆地沉积基准面和可容纳空间分布示意图

Fig. 1 Diagram showing the distribution of baselevel and accommodation in a continental rift basin

按基准面的定义,湖平面不是陆相盆地的基准面。陆相盆地最高平面位置与盆地的泄水口高程一致,沉积物充填至湖平面和湖泊消亡后,还存在基准面与泄水口高程面之间的空间,沉积物可继续向上堆积,形成河流相沉积。不妨称基准面与泄水口高程面之间的空间为I类空间,泄水口高程以下为II类空间(图1)。显然,只有存在II类空间时,才可能形成稳定的湖相沉积。

2 在层序成因分析中的应用

2.1 一套完整层序的组成特征

根据沉积演化阶段、沉积体系组成和边界性质等特征,渤海湾盆地地下第三系一套完整的层序可区分出四种类型体系域(表1)。自下而上为冲积充填体系域(简称冲积体系域)、水进体系域、水退体系域和河流—泛滥沉积体系域(简称河流体系域)。黄骅坳陷南区下第三系孔店组为一发育完整的层序,由四种类型体系域组成,层序下部孔三段厚约300 m,以红色砂质和砾质泥岩为主,间夹灰绿色岩屑砂岩和暗色基性喷出岩,为断陷初期和红色建造,湖相不

发育,属于冲积体系域。孔二段厚度约700 m,中下部为水进期沉积,广泛发育深水暗色泥岩,是黄骅坳陷南区主要的生油层系,属水进体系域。孔二段上部以灰色—灰绿色泥岩为主,逐渐过渡至顶部的杂色泥岩,反映湖泊水体变浅,为水退体系域。孔一段为红色泥岩、砂质泥岩与灰白—灰绿色含泥、含钙及含铁不等粒长石砂岩和砂砾岩互层,表明孔一段形成于河流—冲积环境,属于河流—泛滥平原沉积体系域。

2.2 层序演化特征成因解释

陆相断陷盆地一套层序的规模大体相当于过去所说的“五级旋回”^[4]中的二级沉积旋回,其形成主

表1 渤海湾盆地地下第三系一套完整层序的基本特征

Table 1 Characteristics of a fully-developed sequence in Paleogene Bohaiwan basin

体系域类型	准层序组类型	准层序类型	典型沉积相或沉积体系	体系域边界
河流体系域	上部加积, 下部进积	向上变细	曲流河、泛滥盆地	湖泊消亡面
水退体系域	进积	向上变粗	三角洲、扇三角洲、滨浅湖	最大湖侵面
水进体系域	退积	向上变粗	深湖、浊积扇、扇三角洲	初次湖侵面
冲积体系域	上部退积, 下部加积	向上变细	冲积扇、冲积平原	不整合面

要受二级构造幕控制^[5]。渤海湾盆地早第三纪经历了孔店期、沙四—沙三期和沙二—东营期三期二级裂陷幕,相应地形成三套层序^{[6]①}。实例见后(图5)。

根据二级构造幕沉降过程中可容纳空间演变的沉积响应特点,可以解释一套层序内部四种类型体系域的形成过程(图2)。二级构造幕初期,沉降速率较高,但断陷面积较小,可容纳空间增长速率较低,小于同期供给的沉积物体积时,形成的可容纳空间可能被沉积物全部充填,没有遗留下剩余空间。随后,因边界断层生长,沉降面积增大,可容纳空间增长速率较大,可产生未被沉积物充填的剩余空间。剩余空间较小时,没有形成II类空间(图1),仍然没有稳定的湖相沉积,上述两个阶段形成冲积体系域,以冲积扇体系广泛发育为特色。当剩余可容纳空间较大,存在II类空间时,低于泄水口高程的空间可能被水占据,产生湖泊(图1)。剩余可容纳空间继续扩大时,湖盆规模也就随之扩张,近源沉积相向物源方向退却,形成水进体系域。水进体系域以湖相暗色泥岩广泛发育为特色,是一套层序中烃源岩沉积建造的主要时期。二级构造幕后期,凹陷边界断层的生长速率降低,可容纳空间增长速率小于沉积物

供给速率时,近源沉积相向盆地方向推进,湖盆面积逐步缩小,直至湖泊消亡,此期间形成水退体系域。水退体系域的三角洲和扇三角洲等砂体广泛发育,是最有利油气储集体的形成时期。湖泊消亡后,沉降缓慢或停止,但对河流相沉积而言,至少存在湖泊消亡面至基准面之间的I类空间(图1),沉积物可继续向上堆积,形成河流体系域。

渤海湾盆地地下第三系有的层序不完整,可缺少某种体系域。这种发育不完整的层序同样可以根据可容纳空间演变特点解释。若下一期二级构造幕的沉降作用还没有衰减彻底,就紧接着下一期构造幕,或因构造抬升作用使层序顶部被部份侵蚀,则河流体系域可能缺失,如渤海湾盆地沙四段—沙三段层序通常缺少河流体系域。对于继承性凹陷而言,盆地裂陷后期的二级构造幕可继承原有的构造格局和构造线,其边界断层初始延伸长度就比较大,控制的沉降面积较大,在新的一期二级构造幕早期可容纳空间增长较快时,层序底部的冲积体系域可能欠发育,如黄骅坳陷、济阳坳陷等地区的沙二段—东营组

① 池英柳. 渤海湾盆地地下第三系层序学研究及在油气勘探中的应用: [博士学位论文], 北京: 石油大学, 1996

层序的冲积体系域不发育,直接进入水进体系域阶段。若二级构造幕活动过程中形成的可容纳空间比较小,在一套层序发育过程中始终没有II类空间形成,则没有稳定的湖泊沉积,水进和水退体系域可能都不发育,如冀中拗陷西部拗陷带孔店组层序几乎全部为陆上冲积环境沉积,水进和水退体系域均不发育。

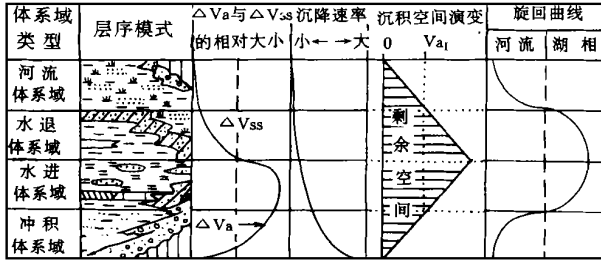


图2 渤海湾盆地地下第三系层序成因分析图
 ΔV_a , 可容纳空间增长速率; ΔV_{ss} , 沉积物供给速率;
 V_{a1} , I类空间

Fig. 2 Genesis analysis of a fully-developped sequence in Paleogene, Bohai Wan basin

层序内部准层序组和准层序的形成分别受三级和四级构造幕沉降过程中可容纳空间演化控制^[5]。如图3,辽河东部凹陷东营组C准层序组为一典型的进积准层序组,由8个向上变粗的准层序组成,形成于东营期沉降作用衰减的背景下,因可容纳空间增长不足,沉积物除了充填新增可容纳空间外,还充填了部分前期遗留下来的剩余空间,导致近源沉积相向盆地方向推进,叠置在远源沉积相之上,构成东营组中下部水退沉积序列的一个次级阶段。退积准层序组形成于新增可容纳空间大于沉积物供给量的条件下,主要是由于沉降范围扩大。如辽河西部凹陷沙四段上亚段为一退积准层序组,形成于沉降面积扩大的背景。当三级构造幕沉降作用形成的可容纳空间与沉积物供给体积处于动态平衡状态时,形成加积准层序组,板桥凹陷沙一段中部满足这种条件,为一加积准层序组。

2.3 层序或体系域边界成因解释

陆相断陷盆地各级层序边界和体系域分界面的形成,大多与幕式构造活动引起的可容纳空间演变有关:(1)因构造抬升,使沉积物高于基准面,遭受侵蚀,形成不整合。由于渤海湾盆地形成于太平洋板块、欧亚板块和印度板块总体汇聚的大背景下,早第三纪三期裂陷幕后,都经历了挤压抬升和遭受不同程度侵蚀的过程,三套层序的边界均是全盆地范围

可对比的不整合(详细论证可参阅笔者的博士论文)。(2)构造沉降缓慢或停止,盆地边缘部分沉积物充填至基准面,可容纳空间消失,形成沉积间断。这是渤海湾盆地地下第三系准层序组和准层序边界的形成条件。如辽河东部凹陷东营组四套准层序组边界,在地震剖面上均存在局部不整合现象,可称为局部不整合,但钻井相序保存完整,说明是沉积间断,没有经过大量侵蚀。(3)在层序发育过程中,剩余可容纳空间由小于I类空间向大于I类空间转变时,河流沉积体制向湖相沉积体制转换,形成初次湖侵面;由大于I类空间向小于I类空间转变时,湖相沉积体制向河流沉积体制转换,形成湖泊消亡面;在剩余可容纳空间大于I类空间前提下,可容纳空间增量由大于沉积物供给量向小于沉积物量转换时,形成最大湖侵面(图2,表1)。

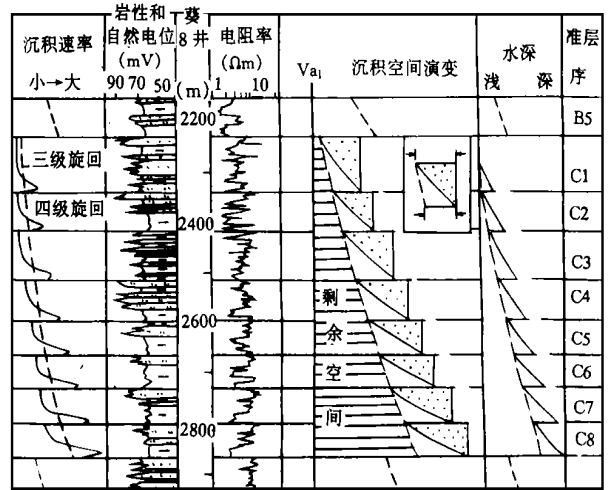


图3 辽河东部凹陷东营组C准层序组特征及其成因分析图
 图中符号含义同图2

Fig. 3 Characteristics and genesis analysis of parasequence set C in Dongying Formation, East Liaohe sag

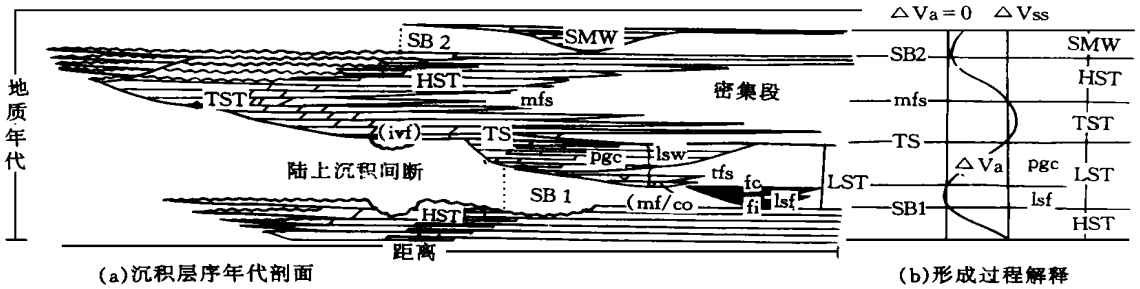
2.4 讨论

应用可容纳空间的概念,可以解释国外学者提出的各种海相层序模式的形成过程,以EXXON研究人员提出的“沉积层序”为例(图4)。“沉积层序”模式提出时,十分强调海平面变化的控制作用^[3]。但只要将海平面变化变换成可容纳空间增量(ΔV_a)与同期沉积供给体积(ΔV_{ss})之间的对比关系,同样可以解释沉积层序的发育过程(图4b)。对于被动大陆边缘盆地而言,海平面下降,意味着可容纳空间为负增长,部分海岸沉积物表面低于基准面,可能部分被侵蚀,而形成所谓的I型层序边界

(SB1),同时,在海盆内形成低水位扇(lsf)。海平面上升初期,可容纳空间增长缓慢,小于沉积物供给速率时,形成低水位进积复合体(pgc)。低水位扇和低水位进积复合体组成低水位体系域(LST)。海平面上升至“沉积坡折”之上的情况下,可容纳空间增长较快,超过沉积物供给速率时,近源沉积相向陆快速迁移,形成海进体系域(TST)。后期,海平面上升速率减慢,可容纳空间增长速率小于沉积物供给速率,

形成高水位体系域(HST)。II型层序边界(SB2)和陆架边缘体系域(SMW)形成于可容纳空间变化不大的条件下。

可见,根据海平面变化解释层序成因做法的本质,是通过海平面变化描述可容纳空间变化,进而解释层序的发育过程。因此,陆相层序成因研究和体系域命名不必拘泥于水位变化。根据水位变化解释陆相层序成因存在一些局限性,如:当河流相沉积无



(a)“沉积层序”年代剖面 (b)形成过程解释

图 4 应用可容纳空间概念分析被动大陆边缘盆地层序形成过程

TS. 初次海侵面; mfs, 最大海侵面; ivf, 侵蚀谷充填; tfs, 扇顶面; lsw, 低水位楔; mf/co, 块体流和越岸沉积; fc, 扇水道; fl, 扇叶; 其余符号含义见正文

Fig. 4 Application of accommodation concept to the analysis of sequence developing process in a passive margin basin

法与某一湖盆联系时,层序形成与湖平面变化无关;开放湖盆的湖平面可以维持在盆地泄水口高程上,没有大的波动,湖相层序发育也难以与湖平面变化相联系^[5]。陆相层序中的体系域可参照原始定义^[8],根据同期沉积体系的总体特征重新命名。本文所说的水进与水退只意味湖盆扩张与收缩,不意味着湖平面升降。

3 在层序划分中的应用

由上述层序成因分析可以看出,一套层序发育过程中,可容纳空间是在不断变化的,其中有两个关键性的变化界面,是可容纳空间演变趋势发生重要转折的界面,可简称为可容纳空间转换面。如图 2 所示,一个转换面形成于可容纳空间增量由大于沉积物供给量向小于沉积物供给量转换的条件下,为叙述方便,称之为 I 型转换面,此面之下剩余可容纳空间逐渐增大,之上剩余可容纳空间逐渐减小。若忽略层序发育过程中可容纳空间演变的细节,那么层序边界是另一个转换面,可称之为 II 型转换面,形成于剩余可容纳空间由减小向增大转换的条件下。

I 型转换面是层序内部的最大欠补偿面,在不同的沉积层序列中为不同类型体系域的分界面。存在湖相沉积时,对应于通常所说的“最大湖侵面”,为水进和水退体系域的分界面。缺少湖相沉积时,为冲积充填体系域和河流泛滥沉积体系域的分界面。II 型转换面为前期二级构造幕结束和后期构造幕起始的地层分界面,对这一点下面将通过沧东凹陷的例子加以论证。

可容纳空间转换面可依据以下标志识别:(1)在地震剖面上,一般根据不整一反射界面识别;(2)在单井层序划分时,一般根据古生物化石(水生生物化石尤其有效)丰度和分异度发生明显变化的转折面、各种相标志所确认的相序演化趋势的转折面、地球化学参数变化的转折面等特征识别;(3)在地层对比剖面上,一般根据地层叠置型式发生变化的转折面识别。最后,从成因和演化角度统一各种信息,确认层序和体系域的边界。具体识别方法已有大量文献介绍,这里不一一赘述。仅着重介绍一般方法难以识别层序或体系域边界时,如何应用可容纳空间转换面概念来识别,这是引入这一概念的主要目的。

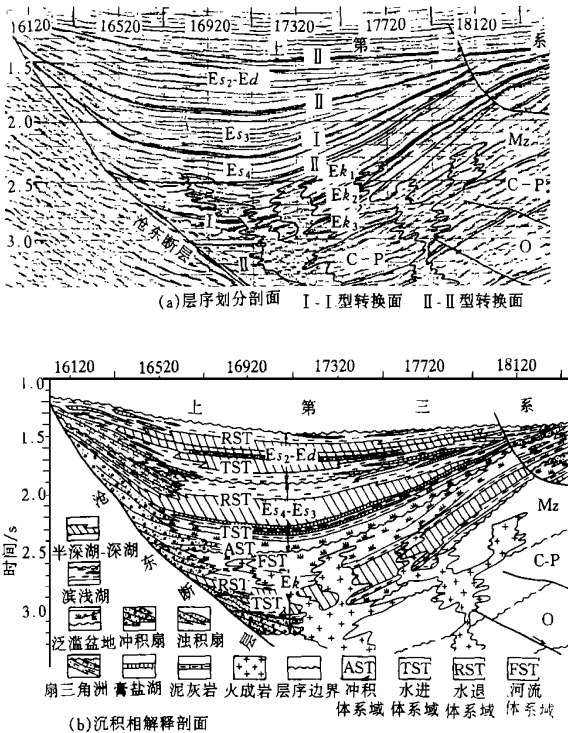


图5 沧东凹陷I 31095 测线层序解释剖面
 Fig. 5 Sequence interpreted section of seismic line I 31095 in Cangdong sag

应用可容纳空间转换面的概念,通过分析沉积样式的变化,在地震剖面上可同时识别出I型和II型转换面,这对于缺少不整合现象时的地震层序划分尤其有用,这种情况在渤海湾盆地下第三系层序划分时经常遇到。如图5,黄骅坳陷南区沧东凹陷下第三系内部的地震不整合现象不清楚,但依据沉积样式变化,在地震剖面上可直接识别可容纳空间转换面,从而达到划分层序的目的。沧东凹陷下第三系孔店组(Ek)和沙四段—沙三段(Es4—Es3)两套层序的上部和下部,沉积样式存在明显差异。层序的下部近沧东断层一侧沉积厚度大,凹陷中心厚度小;上部则在凹陷中心的厚度较大。因此,能够明显区分沉积样式变化的地震反射界面就是可容纳空间转换面。

这一方法的理论依据在于:沉积样式的差异反映了凹陷边界断层活动的阶段性。早第三纪前两个二级构造幕早期,沧东断层活动强烈,沉降速率较高,可容纳空间增长较快。因粗碎屑物质倾向于近源堆积,所以层序下部在凹陷边缘沉积厚度较大。

二级构造幕后期,沧东断层活动性减弱,沉降速率降低,可容纳空间增长缓慢,沉积物在凹陷边缘区首先充填至基准面,后续进入盆地的沉积物不再继续向上堆积,使堆积中心向凹陷中心转移,从而导致层序上部的厚度在凹陷中心较大。因此,根据沉积样式变化识别的I型和II型转换面,代表边界断层不同活动阶段的地层分界面,由此确定的层序边界和内部体系域分界面具有成因意义。因构造作用在一定范围内具有同步性,用此方法划分的层序具有等时意义。

根据笔者的经验,应用上述方法进行地震层序划分,需要注意两点。(1)可容纳空间转换面应当首先在主要物源入盆区的倾向剖面上识别,然后通过地震测线之间的追踪闭合,确定其它测线可容纳空间转换面的位置,从而建立全区的层序格架。在主要物源进入盆地的地区,沉积物堆积速率较高,在凹陷边缘可以“追补”断块沉降形成的可容纳空间,由此确定的转换面能反映全区的特点。(2)陆相断陷盆地沉降作用受边界断层控制,根据陡坡区沉积样式变化,可以比较准确确定转换面的位置。

除在地震不整合现象不清楚时地震层序划分应用外,可容纳空间转换面概念至少还有三种应用途径:(1)地震反射不整合界面明显时,应用可容纳空间转换面概念有助于辨别不整合界面的性质,将层序边界与体系域或准层序组边界区分开来。二连盆地白音查干凹陷下白垩统内部不整合界面较多,可容纳空间转换面概念正是在分析该区不整合界面性质时提出的;(2)当一套层序内部没有湖相沉积而只有河流相沉积时,目前没有合适的概念,用于区分和描述体系域之间的分界面。鄂尔多斯盆地伊盟地区上古生界以河流相、泛滥盆地相沉积为主,我们直接用I型转换面命名层序内部体系域的分界面;(3)将层序和体系域划分抽象为识别可容纳空间转换面,有助于统一信息和建立统一层序格架。这是因为各种地质、地球物理、地球化学资料所反映的地质意义不同、分辨率高低不一样。所以如何去伪存真、统一信息是建立统一层序格架的关键。通过分析可容纳空间演变特点,识别转换面不失为一种有效思路。如果单井资料识别的界面不是转换面,则钻井层序划分与地震层序划分结果不可比。

4 结论

可容纳空间概念可应用于陆相断陷盆地层序成

因分析和层序划分。根据二级、三级和四级构造幕沉降过程中可容纳空间增量与同期沉积物供给体积之间的对比关系,可以解释陆相断陷盆地层序、准层序组和准层序的形成过程。而沉积过程恢复对层序划分起指导作用。通过分析沉积样式的差异,在地震剖面上可直接识别出两个可容纳空间转换面,同时确定一套层序中两个最重要的地层界面,即层序边界的层序内部最大欠补偿面,存在湖相沉积时,后者对应于最大湖侵面。

根据可容纳空间增量与同期沉积物供给体积之间的对比关系,同样可以解释被动大陆边缘层序发育过程。说明根据海平面变化解释层序成因做法的思想本质,是通过海平面变化描述可容纳空间变化。因此,陆相层序成因分析和体系域命名时,不必拘泥于水位变化,体系域应当根据同期沉积体系的总体特征重新命名。

致谢:这篇文章是我博士论文的一部分,感谢我的导师张万选教授、张厚福教授、冯增昭教授的多年指导!感谢学报编辑对本文提出具体、贴切的修改意见!

参 考 文 献

- 1 Jervey M T. Quantitative geological modeling of siliclastic rock sequence and the seismic expression. SEPM Special Publication 42, 1988. 47 ~ 69
- 2 Wheeler H E. Baselevel, lithosphere surface, and time-stratigraphy. GSA Bulletin 1964, 75(5): 599 ~ 610
- 3 Posamentier H W, Jervey M T, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition I - conceptual framework. SEPM Special Publication 42, 1988. 109 ~ 124
- 4 胡见义, 黄第藩, 徐树宝等. 中国陆相石油地质理论基础. 北京: 石油工业出版社, 1991. 126 ~ 129
- 5 池英柳, 张万选, 张厚福等. 陆相断陷盆地层序成因初探. 石油学报, 1996, 17(3): 19 ~ 26
- 6 池英柳. 渤海湾盆地含油气系统形成与油气分布特征. 见: 胡见义, 赵文智主编. 中国含油气系统的应用与进展. 北京: 石油工业出版社, 1997. 195 ~ 206
- 7 Haq B U, Jan Hardenbol Vail P R. Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and eustatic cycles. SEPM Special Publication 42, 1988. 71 ~ 108
- 8 Brown JR L F, Fisher W L. 沉积层序的地震地层学解释: 巴西断裂和拉张盆地的实例见: 牛毓荃等译. 地震地层学. 北京: 石油工业出版社, 1980. 153 ~ 188

Applications of Accommodation Concept to Sequence Study in a Continental Rift Basin in Case of Paleogene, Bohaiwan Basin

Chi Yingliu

(Scientific Research Institute of Petroleum Exploration and Development CNPC Beijing, 100083)

Abstract

The concept of depositional accommodation has been applied to sequence genesis analysis and sequence division for continental rift basins with examples from Paleogene, Bohaiwan basin. The developing process and its major characteristics of a sequence, a parasequence set and a parasequence in a continental rift basin can be interpreted respectively according to the changing of new space added during the 2nd, the 3rd and the 4th order episodic tectonic subsidence in corresponding to the volume of sediments supplied. Conditions to form bounded surfaces of sequences and systems tracts can also be described and understood through an analysis of depositional accommodation changes. As a result of accommodation evolution analysis, a new concept, the turn-around surface of accommodation variation, has been introduced and applied to recognize boundaries of sequences and systems tracts.

Key words depositional accommodation sequence genesis turn-around surface of accommodation variation sequence division continental rift basin