

文章编号: 1000-0550 (2005) 02-0297-06

高分辨率层序地层分析中基准面变化的讨论

李江涛 李增学 郭建斌 余继峰

(山东科技大学地球信息科学与工程学院 山东青岛 266510)

摘要 基准面有三个不同的概念,即侵蚀基准面、沉积基准面和地层基准面。目前对于基准面的解释和应用存在争论,在应用中尤其比较模糊。在对高分辨率层序地层学中地层基准面的解释进行分析及基础上,对其在解释以海相沉积环境为主的部分提出了质疑并就可容空间与地层基准面的关系问题进行了讨论。可容空间是层序地层学关键概念,基准面也是层序地层学很重要的概念,两者对于解释层序形成机制是非常重要的。侵蚀基准面、沉积基准面、地层基准面都是势能面,都是动力学界面,都是变化的,只是分析的基准不同、形成的机制不同。为了深入地揭示这三种基准面的特征,还应该考虑基准面的定量研究问题。

关键词 可容空间 基准面 海平面

第一作者简介 李江涛 男 1981 年出生 硕士研究生 层序地层学

中图分类号 P539.2 文献标识码 A

层序地层学由于其学术上的先进性和实践上的巨大应用价值,已经被广大的地质工作者所认可和接受,并被广泛应用于油气勘探和盆地分析的实践中,取得了巨大的成就,获得了显著的经济效益。尽管层序地层学的发展是迅速的,并取得了巨大的成就,但其理论和方法有一个成熟和完善的过程。随着盆地油气勘探与开发向更复杂和更深入的方向发展,以及隐蔽油气藏勘探风险的不断增加,石油地质学家需要更精确的技术,以提高层序地层分析的分辨率和储层预测的准确性。在这种背景下,高分辨率层序地层学分析理论与方法应运而生^[1,2]。高分辨率层序地层学是以露头、岩心、测井和高分辨率地震反射剖面资料为基础,运用精细层序划分和对比技术,建立油田乃至油藏级储层的成因地层骨架。高分辨率层序地层学理论的核心内容是“在基准面旋回变化过程中,由于可容纳空间与沉积物补给通量比值的变化,相同沉积体系域或相域中发生沉积物的体积分配作用和相异作用,导致沉积物的保存程度、地层堆积样式、相序、相类型及岩石结构和组合类型发生的变化”^[3,4]。通过详细研究高分辨率层序地层学的思路和方法,结合含煤和含油气盆地层序地层学研究的实践,对高分辨率层序地层中“地层基准面”概念及其应用,以及与可容空间含义及关系提出几点看法。

1 关于基准面原理和可容空间概念

1.1 基准面原理

基准面有三个不同的概念,即侵蚀基准面、沉积基准面和地层基准面。经典层序地层学的主要对比面有三种类型,即最大洪泛面、海水进蚀面和地层不整合面以及与之对应的整合界面。T. A. Cross 认为,受海平面、构造沉降、沉积负荷补偿、沉积物补给、沉积地形等综合因素制约的地层基准面,是解释地层层序成因并进行层序划分的主要依据^[5]。Cross 等引用并发展了 Wheeler 提出的基准面的概念,指出地层基准面既不是海平面,也不是海平面向陆方向的水平延伸,而是一个相对于地表波状起伏的、连续的、略向盆地地下倾的连续势能面(非物理面,图 1),其位置、运动方向及升降幅度不断随时间变化^[6,7]。它反映了地球表面与力求其平衡的地表过程间的不平衡程度。基准面变化的趋势总是向其幅度的最大值或最小值单向移动,构成一个完整的上升下降旋回。基准面的一个上升与下降旋回称为一个基准面旋回。基准面可以完全在地表之上,或地表之下摆动,也可以穿越地表之上摆动到地表之下再返回,后者称基准面穿越旋回。一个基准面旋回是等时的,在一个基准面旋回变化过程中(可理解为时间域)保存下来的岩石为一

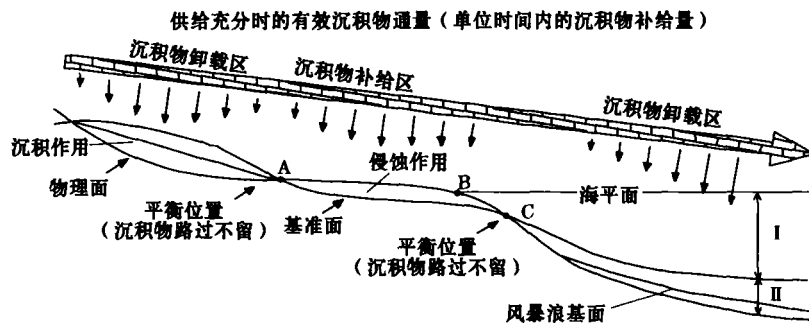


图 1 基准面、可容空间示意图

(原图据 Cross, 1994. A、B、C等点和、为作者所加)

Fig 1 Schematic diagram of base-level and accommodation space (after Cross, 1994)

个成因地层单元,即成因层序,以其时间面为界面,因而为一个时间地层单元。在地层记录中代表基准面旋回变化的时间—空间事件表现为岩石+界面(间断面)。因此,一个成因层序可以由基准面上升旋回和基准面下降半旋回所形成的岩石组成,也可由岩石+界面组成。

1.2 可容空间

据 Cross 等人的定义,可容空间是指位于基准面之下的、沉积物表面与基准面之间可供潜在沉积物充填的全部空间(图 1 中海盆部分的可容空间),包括老空间(早期未被充填遗留下的空间)和新增空间。在某一特定时间、特定位置的可容空间,决定着该处可能聚集的沉积物的最大体积^[8,9]。新增可容空间是指在沉积物沉积的同时形成的可供沉积物充填的空间。可容空间是与基准面相伴而存在着的,可容空间的增加与减少直接受控于基准面的升降和基底构造沉降。当基准面位于地表之上时,提供了沉积物的空间,沉积作用发生;当基准面位于地表之下时,可容纳空间消失;当基准面与地表一致(重合)时,既无沉积作用又无侵蚀作用发生,沉积物仅仅路过而已。因而在基准面变化的时间域内(时间是连续的),在地表的不同地理位置上表现为四种地质作用状态,即沉积作用、侵蚀作用、沉积物路过产生的非沉积作用及沉积物非补偿产生的饥饿性沉积作用乃至非沉积作用。可容空间的充填速率、保存程度以及内部结构特征,取决于沉积物对盆地供给的速率,即可容纳空间与沉积物补给通量的比值(A/S)的变化。当 $A/S < 1$,即沉积物供给速率大于可容空间增加速率时,基准面缓慢下降,形成向海(湖)盆方向推进的进积叠加样式; $A/S > 1$ 时,基准面上升,形成向陆推进

的退积叠加样式; $A/S = 1$,处在基准面上升与下降的转换时期,形成短期旋回加积叠加样式^[10]。但是上述对可容空间的讨论均未对图 1 中部分作科学合理的解释。

2 高分辨率层序地层分析中的基准面变化的讨论

2.1 几个重要的沉积动力学界面

控制层序发育和特征的有几个重要的动力学界面,如海平面、浪基面、侵蚀面和基准面等,其中基准面是最为重要的沉积动力学界面。

2.1.1 海平面

海平面,分为绝对海平面和相对海平面。绝对海平面,又称全球性海平面,是指海面相对于一个固定基准面,如地心的位置,因此它和局部因素是无关系的,其升降是其它因素引起的海水体积的变化引起的。相对海平面体现了局部沉降和上升,指的是相对处在或者靠近海底的一个基准面的位置(例如基岩)的海面位置。在滨浅海环境中,沉积物可容空间是相对海平面变化决定的,而相对海平面又决定于构造沉降和全球海平面变化。海平面的相对上升或下降决定了是否有可供沉积物充填的新空间的形成,相对海平面上升则增加可容空间,而相对海平面下降则减少可容空间^[11]。从物质平衡的观点分析,海平面是海水体积和洋盆体积(容积)的统一;从能量平衡的观点看,海平面是一个等势面,它符合地球内部重力场分布的平衡,也符合地球绕着它的转动轴自转的引力平衡。

2.1.2 正常浪基面

海洋盆地中,一般按气候条件分为正常天气(Fair-Weather)和强风暴天气(Storm-Weather)。正常

天气的波浪多是低幅度、长周期的涌浪,只能在较浅的水体中搬运中等数量的沉积物,一般海水盆地在正常天气风浪所能波及海底的深度仅为 20~30 m。

正常天气时,位于浪基面之上的浅海沉积物尽管处于不稳定状态,不断、时时的被风浪所波及、剥蚀,但仍然可以接受沉积物,并发生沉积作用,波痕、层理、浊积岩的形成便是很好的例证。

2.1.3 风暴浪基面

由大旋风、飓风等形成的强风暴天气,风暴浪所能波及的深度远远超过正常天气的浪基面。强风暴天气多形成高能量短周期的波浪,可以使波及面大大加深并搬运大量沉积物,风浪所能波及海底的深度可达到 200 m 以下。强烈的风暴浪能从固结较好的基底中撕扯沉积物,此时在风暴浪基面以上至海平面的巨大空间发生风暴剥蚀事件。风暴沉积通常是正常浪基面与风暴浪基面之间浅海陆架环境的产物。

2.2 基准面变化的讨论

2.2.1 基准面概念

以下是侵蚀基准面、沉积基准面传统或者经典的定义:

侵蚀基准面作为陆地上的风化剥蚀作用到达终极状态时的临界面,一般认为其相当于平均海平面及海平面在水平方向上的向陆地延伸面。理论上讲,海洋是沉积作用的最终场所,在地表营力作用下发生的削高填低地质作用,最终会达到终结状态——夷平地表现填平海盆,因此海平面自然被看作是最终夷平面。

沉积基准面作为一个抽象的动态平衡面,在此面之上沉积物不稳定,不发生沉积作用而是发生侵蚀作用;在此面之下沉积物会发生沉积作用;在此面附近沉积物即不发生沉积作用,也不发生侵蚀作用。沉积基准面的变化直接导致了沉积物的堆积和剥蚀,特定的沉积岩相以及岩相组合均与基准面的变化相联系^[12]。在横向上,基准面的变化导致可容空间和沉积补给通量的重新调整,其比值(A/S)的变化与基准面的变化相联系。当基准面下降时,原沉积物遭受剥蚀或水下沉积物表面水动力强,保存下来的是不整合界面或整一的不连续面,界面之上可能有滞留沉积或突变的沉积物保存。基准面上升时,沉积物源供给渐显不足,形成非补偿和补偿沉积,可能出现短暂而范围广泛的过境表面,并促使基准面上的沉积物开始重新分配。也就是说沉积基准面的变化及其可容空间变化控制着地层的结构和沉积特征。

侵蚀基准面、沉积基准面和地层基准面应该是具

有重要区别的三个不同的动力学界面。以上对侵蚀面和沉积基准面的论述是模糊的。侵蚀基准面是一个老的概念,在使用中也比较清楚。但侵蚀面“相当于平均海平面及海平面在水平方向上的向陆地延伸面”也是不科学的,它实际上在陆上和近海地区是不同的,是一个由陆到海洋盆地的一个势能面。每个地方的侵蚀面是不同的。沉积基准面和地层基准面概念的使用更是存在混乱,使得很多情况下与侵蚀基准面无法区别。侵蚀面与沉积基准面之间的关系如何,在这里并没有论述清楚。从沉积学和沉积机制方面分析,在侵蚀面之上仍然可以发生沉积作用,如在以冲积沉积为主的地区,粗粒沉积物堆积多发生在当地侵蚀基准面之上。因此,沉积基准面是一个抽象的动态平衡面。在这里侵蚀基准面与沉积基准面的区别是显而易见的。

2.2.2 高分辨率层序中的基准面变化讨论

高分辨率层序中提出了地层基准面的概念,使得人们对侵蚀基准面和沉积基准面的概念产生了模糊认识,作者认为这主要是高分辨率层序中的地层基准面模式中有关地层基准面的论述,以及对其与可容空间的关系没有论述清楚。这样造成在进行基准面旋回的解释时,把当地或具体盆地的水平面变化与基准面混淆了,进而造成了侵蚀基准面旋回与侵蚀面旋回没有什么区别而盲目使用的结果。

高分辨率层序中的基准面变化模式中有如下几个值得商榷的问题:

(1) 通过对图 1 的分析可以看出,在相对海平面与地表交汇处 B 点的以陆上沉积环境为主的部分(包括滨岸带在内的地区),地层基准面变化的分析与侵蚀基准面没有太大差异,与沉积基准面的概念也比较接近,三者在这一范围的含义及其变化机制比较一致或接近:当地层基准面位于地表之上时,地表和地层基准面之间提供沉积物的可容纳空间,因而地表发生沉积作用,其间任何的侵蚀作用均是局部和暂时的;当基准面位于地表之下时,可容空间消失,进而沉积作用消失代之以侵蚀作用的发生;基准面与地表交汇处的路过不留点(A 点)既无沉积作用又无侵蚀作用,发生沉积物仅仅路过的非沉积作用;当基准面位于地表以上,且沉积物供给严重不足时,将产生饥饿性沉积作用或非沉积作用。因而在一个完整的基准面旋回组成或由不完整的半旋回及反映侵蚀或间断的界面,即“岩石+界面”的形式表现出来。

(2) 在地表(物理面)与相对海平面相交(B 点)

的向盆地方向的以海相沉积环境为主的部分,地层基准面的位置向盆地甚至可以接近风暴浪基面(见图 1)。而可容纳空间是指地球表面与基准面之间可供沉积物堆积的空间(见图 1 中的)。根据这一已被广泛接受得定义,那么位于地层基准面之上的部分就不应纳入可容空间的范畴,而这一部分在图 1 中具有相当的水深。但是,毫无疑问,在空间 中沉积作用是非常普遍和重要的,如何应用可容空间的动态变化机制解释其沉积充填规律则产生了与层序地层学概念体系相违的现象。即在图 1 中 部分的地层基准面与可容空间无法统一起来。

(3) 关于沉积物路过不留点的问题

根据地层基准面原理,在基准面与地表的交汇处,侵蚀作用和沉积作用达到平衡状态或者说既无沉积作用又无侵蚀作用发生,沉积物仅仅路过而已,称之为沉积物的路过不留点(如图 1 中的 A、C)。“沉积物路过不留 在地层基准面解释中有其理论意义,但在实际的层序划分和地层基准面旋回识别中是无法确定的。图 1 中的 A 点是陆相沉积环境中地层基准面与沉积物理面的交点,作为沉积物路过不留点似乎是不可质疑的,但在海相环境中有关路过不留点(C 点)的解释却遇到了困难。通过前面的分析,海平面与基准面之间的巨大空间 是不是可容空间仍存在质疑,而 C 点位于可容空间之上又作为“沉积物路过不留点”,在概念上似乎无法解释。如何解释海相沉积环境中的平衡位置或者沉积物路过不留点 C 与可容纳空间 的关系,是高分辨率层序地层学的基准面原理所面临的一个挑战。因为这一点不仅仅涉及到高分辨率层序地层学的基础问题,还对建立在此基础上的诸如沉积物的体积分配、相分异和旋回等时对比法则等核心内容产生重要的影响。

3 基准面概念的应用

近年发表了大量有关高分辨率层序地层学研究的成果,对于层序地层学的丰富和发展是有积极意义的,而且在指导油气勘探中发挥了很好的作用,取得了显著的经济效益。但作者认为,在地层基准面旋回划分中,仍然存在概念模糊的问题。如在实际工作中,是根据地层沉积环境所反映的所谓水深水浅划分旋回,这实际上还是所谓水平面升降的问题,当然也可以用水进水退机制确定旋回或解释旋回特征。在这里就出现一个很值得思考的问题,侵蚀基准面和地层基准面如何在高分辨率层序划分中区别开来是模

糊不清、含糊其词的。当然,图 1 中的以海相环境为主部分的地层基准面在实际工作中更是无法区别出来。这就使得传统旋回划分与高分辨率层序地层学中的地层基准面划分的关键性科学点区别在实际工作中无法说的清楚。如图 2,是对淮南煤田含煤地层的中短期基准面旋回划分的一个实例(片段)^[13,14],根据地层反映的沉积环境变化,进而推测当时可容空间变化导致的沉积物堆积特征获得的地层基准面旋回特征或结构。其中侵蚀作用、聚煤作用这两个作用是划分基准面旋回的主要依据,这可以说是图 1 中与 共同作用的结果。即在盆地分析中,水(海)平面的变化是非常重要的因素。

这样的论文屡见不鲜、层出不穷。问题是地层基准面是不是符合经典高分辨率层序地层学的概念是值得探讨的。这首先就是地层基准面的概念必须与侵蚀和沉积基准面严格区分开来,不然,所谓的基准面旋回划分是毫无意义的。所以,有些学者对基准面作出了不同解释。Shanley 和 McCabe(1994)指出,相对海平面是大陆边缘和浅海环境基准面的令人满意的替代物,而河流平衡剖面、湖平面及地下潜水面可分别作为河流环境、湖泊环境及沙漠的基准面^[15]。

4 几点看法

4.1 基准面概念的厘定

基准面一词在自然学各学科中的应用十分广泛,地质学或沉积学中尤甚,因而与之对应的定义也较多。前面提及的如侵蚀基准面、沉积基准面、地层基准面等,尽管它们有着各自的较为明确的定义,其地质含义也不尽相同。毫无疑问,尽管称谓不同,大家讨论的却是同一事物,通常在实际运用中也不会苛意区分(很多情况下也无法区分)。所谓“基准”不过“标准”或“参照”之意,实为研究某一地质事物或地质过程的参照面。它应具有如下特点:基准面的状态是动态的,由于影响侵蚀—沉积作用的各种因素是不断变化的,基准面的位置和形态只有响应的因时因地的变动才能维持沉积和侵蚀这两种动态地质作用过程的平衡^[16];基准面不是某一单纯的物理界面,而是一个抽象的势能面,但在某种具体的情况下可以找到合适、具体的物理面作为理想的替代物,也就是说并不存在一个统一的基准面。

4.2 陆上与盆地基准面的统一

由于基准面是连续的波状起伏面,要同时受到局部因素的影响,陆地和盆地两种沉积环境差别较大,

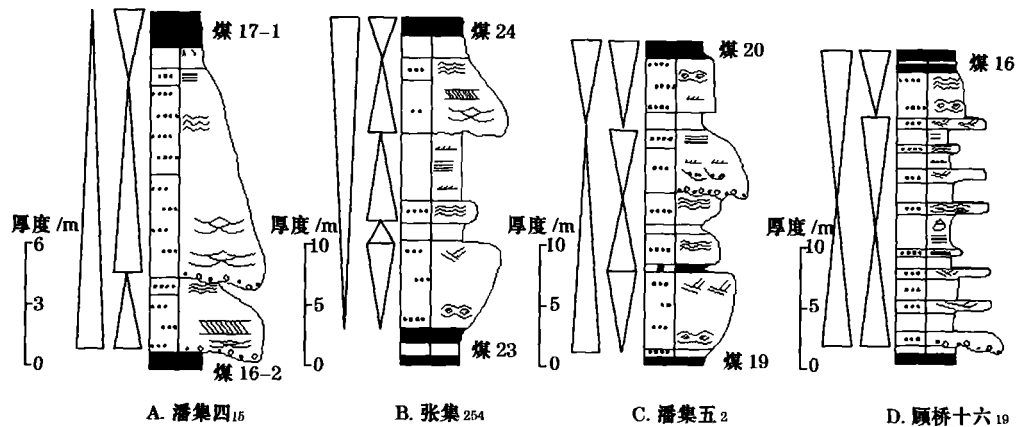


图 2 淮南煤田中短期基准面旋回划分(部分)(据李增学等,2000)

Fig 2 Division of the mid and short-period base-level cycles in Huainan coal field (partial) (after Li Zengxue, *et al* 2000)

基准面各处的运动规律因而也不会是完全一致的。Cross 等有关基准面的在陆地部分的解释还是令人满意的,即认为基准面是相对于地球物理表面上下震动并横向摆动的抽象势能面。但在海(湖)相的解释则是值得商榷的。无论是陆上还是海盆,无论是侵蚀基准面、沉积基准面,还是地层基准面,其划分和机制都应该是各自统一的,并将其作为动力学波动或运动面进行分析。因此,笔者认为,图 1 中的部分也应纳入可容空间之中,平均海平面作为可容空间的参照面是合理的。

4.3 基准面的定量研究问题

侵蚀基准面、沉积基准面、地层基准面都是势能面,都是动力学面,都是变化的。只是考虑的基准不同、机制不同,因此还应该考虑基准面的定量研究问题。目前这方面的研究还比较薄弱,成果也很少。因此高分辨率层序地层学对于地层基准面的定量研究应是今后的重点攻关的方向。

参考文献 (References)

- 薛良清. 层序地层学研究现状、方法与前景. 石油勘探与开发, 1995, 22 : 8 ~ 13 [Xue Liangqing. Current status, methodology and future directions of sequence stratigraphy study. *Petroleum Exploration and Development*, 1995, 22 : 8 ~ 13]
- 孟万斌. 从层序地层学到高分辨率层序地层学. 成都理工学院学报, 2000, 29 : 380 ~ 385 [Meng Wanbin. From sequence stratigraphy to high resolution sequence stratigraphy. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2000, 29 : 380 ~ 385]
- 邓宏文. 美国层序地层研究中的新学派——高分辨率层序地层

- 学. 石油与天然气地质, 1995, 16 : 89 ~ 97 [Deng Hongwen. A new thought in sequence stratigraphic studies in U. S. A: high-resolution sequence stratigraphy. *Oil and Gas geology*, 1995, 16 : 89 ~ 97]
- 邓宏文. 沉积物体积分配原理——高分辨率层序地层学的理论基础. 地学前缘, 2000, 7 : 305 ~ 313 [Deng Hongwen. Sediment volume partition principle: theory basis for high-resolution sequence stratigraphy. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7 : 305 ~ 313]
- Cross T. A. High-resolution stratigraphic correlation from the perception of base-level cycles and sediment accommodation. In: *Proceeding of Northwestern European Sequence Stratigraphy Congress*, 1994. 105 ~ 123
- Wheeler H E. Base-level, lithosphere surface and time-stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 1964, 75: 599 ~ 610
- Cross T. A. Controls on coal distribution in transgressive-regressive cycles, Upper Cretaceous, Western Interior, U. S. A. In: Wilgaus C K, et al. *Sea-level changes: An integrated approach*. SEPM Special Publication, 1988, 42: 371 ~ 380
- Posamentier H W, Jervey M T, Vail P R. Eustatic controls on clastic deposition: Conceptual Framework. SEPM Special Publication, 1988, 42: 109 ~ 125.
- 徐怀大. 层序地层学原理. 北京:石油工业出版社, 1993. 138 ~ 184 [Xu Huaida. *The theory of sequence stratigraphy*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. 138 ~ 184]
- 池秋鄂, 龚福华. 层序地层学基础与应用. 北京:石油工业出版社, 2001. 35 ~ 36 [Chi Qiu'e, Gong Fuhua. *The basis and the application of sequence stratigraphy*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001. 35 ~ 36]
- 纪友亮, 张世奇. 层序地层学原理及层序成因机制模式. 北京:地质出版社, 1998. 93 ~ 95 [Ji Youliang, Zhang Shiqi. *The Theory of Sequence Stratigraphy and Mechanic Patterns of Formation Cause of Sequence*. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 93 ~ 95]
- 王龙樟, 刘海兴. 基准面变化与层序地层——以塔里木盆地陆相

- 地层为例. 岩相古地理, 1998, 18 : 1 ~ 6 [Wang Longzhang, Liu Haixing Base-level changes and nonmarine sequence stratigraphy: an example from the Tarim Basin, Xinjiang Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1998, 18 : 1 ~ 6]
- 13 李增学, 魏久传, 韩美莲. 鲁西陆表海盆地高分辨率层序划分与海侵过程成煤特点. 沉积学报, 2000, 18 : 362 ~ 368 [Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Han Meilian. The division of high-resolution sequences and the transgressive coal formation in the epicontinental basin of the western Shandong Province. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18 : 362 ~ 368]
- 14 李增学, 魏久传, 魏振岱. 含煤盆地层序地层学. 北京: 地质出版社, 2000. 146 ~ 147 [Li Zengxue, Wei Jiuchuan, Wei Zhengdai. Sequence stratigraphy of coal-bearing basins. Beijing: Geological Publishing House, 2000. 146 ~ 147]
- 15 Shanley KW, McCabe P T. Perspective on the continental sequence stratigraphy. AAPG Bulletin, 1994, 78 : 544 ~ 568
- 16 王嗣敏, 刘招君. 基准面与可容空间变化分析及应用. 世界地质, 2001, 20 : 1 ~ 7 [Wang Simin, Liu Zhaojun. The analysis of base-level and accommodation space change and its application. World Geology, 2001, 20 : 1 ~ 7]

Discussion about Base-level Changes in the Analysis of High-resolution Sequence Stratigraphy

LI Jiang-tao LI Zeng-xue GUO Jian-bin YU Ji-feng
(Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266510)

Abstract There are three different conceptions about base-level that are base level of erosion, base level of deposition and stratigraphic datum, respectively. At present, the arguments still exist in the explanation and the application of base-level, especially base-level seems amphibious in use. The explanation of the stratification base-level in the high-resolution sequence stratigraphy is analyzed in this paper, and, in particular, the portion focused on illustration about marine facies sedimentary environment is questioned. The author discussed the relation between accommodation space and stratigraphic datum. Accommodation space is the key conception in sequence stratigraphy and base-level is also important, so they are very significant to illustrate the mechanism of the formation of sequence. Base level of erosion, base level of deposition and stratigraphic datum are all potential energy levels, kinetic surfaces and are all variable, just differing from the criterion of analyses and the mechanism of formation. To illustrate the features of these three base-levels profoundly, more questions of quantitative research into base-level should be considered.

Key words accommodation space, base-level, sea level