

层序地层学基础和关键定义

李 文 汉

(成都地质矿产研究所)

一、概 述

本文目的是介绍层序地层学的基本概念和一些关键定义。

层序地层学主要研究年代地层学格架中岩石的相互关系。这种年代地层学格架是重复的、以侵蚀面或无沉积物,或与其相应的整合面为界的、成因相关的地层。

层序地层学是通过识别由海平面升降周期性变化所产生的沉积特征来划分对比地层、定年和解释地质记录的新方法,是在地震地层学理论上发展起来的,与沉积学、生物地层学和其它确定年代方法紧密结合的一门新兴学科。

对沉积盆地内充填的重复性沉积层序的地层分析,常因地表露头不足或出露不好而难以得到令人信服的解释,但在地震剖面上则能系统而全貌地看到这些重复的沉积层序,于是地震地层学得以发展。显然,在地震地层学基础上发展起来的层序地层学,必定包含有前者的许多基本概念和术语,甚至有时是不能截然分开它们的。

这里,首先要介绍 Vail 等人(1977)的观点和概念。他们把海岸上超、海相(深水)上超、底超和顶超综合成一个高度概括的模式。这个模式涉及相对海平面不对称的周期性振荡。他们将海平面相对于陆地表面的上升或下降定义为一次相对变化,该变化可由海平面或陆地表面的上升、下降、或两者综合作用而引起。他们识别出局部的、区域的和全球的海平面相对变化周期,并将海平面相对变化周期定义为海平面一次相对上升或下降的一个周期是由海平面的逐渐相对上升、一个静止期和一次快速相对下降所组成。总的逐渐上升被解释为由几个较小规模的迅速上升和静止组成,它们被称为准周期。若干个相对周期呈现持续上升到较高的相对海平面位置,然后经一次或多次较大的相对下降,降到较低的位置,这个更高级的周期称为超周期。尽管他们认为某些周期可能是局部的或区域范围的,但大部甚至全部周期都具有全球意义。他们声称大多数区域性周期最终都可确定为全球规模的,并指出,在地球上三个或更多个相距很远的区域内同时发生的相对变化可解释为海平面的全球性变化。请读者注意,Vail 可说是地震地层学及层序地层学的奠基人,因此他的概念和观点已得到普遍应用和流传。但就上述模式而言,仍是有不同看法的。首先,旋回性层序是否主要受绝对的海平面升降变化所控制;其次,海平面升降速度是否总是大于盆地沉降速率。鉴于本文的目的,将不细致地讨论和介绍这些争议。

二、层序及其地质含义

层序地层学的基础单位是层序(sequence),它们以不整合或相当的整合面为界。沉积层

序也是地层学单位,具有年代地层学意义,因为层序内的所有岩石都是沉积在被层序边界(在整合接触的地区)的年代所限制的地质时间间隔内。在边界是不整合的地区,层序内地层年代虽然各地不同,但一般说来不整合面上的岩石均较其下的岩石年青。层序是由地层本身的物理学关系所确定的,而不主要取决于岩石类型、化石、沉积作用或给定层系内其它主观的和变化的原则,因此它较仅以任意挑选的等时面为界的地层单位有更大的地史意义。确切地说,层序代表沉积在单一成幕事件时期的成因单位,而任意挑选的单位可能分开两个或更多的沉积层序,因此不能准确地描述沉积历史。沉积层序也是盆地内一个较大的成因单位,其内部的地层一般是整合的,由各种各样的相组成,但等时地层反射横向上可以穿过不同的岩相。正是由于这种与成因有关的时间—地层特性,使层序在盆地分析中显得非常重要。因为,一个盆地被叠复的沉积层序充填,它们通常排列成由退复和超复的海相地层以及有关的海岸超复地层组成的若干旋回。海平面相对变化控制了旋回沉积,而海平面相对变化本身又受海平面的升降变化、盆地沉降和掀斜速率变化,以及沉积速率变化的相互作用所支配。所以,正确的分析层序就能了解上述这些变化,从而了解当时海平面变化情况及古地理概貌。

一个层序可分为不同的体系域(systems tracts),它们受其本身在层序内的位置和准层序与准层序组(parasequence sets)的叠置形式所限定。准层序和准层序组以海洋淹没面(marine—flooding surfaces)为界。层序、准层序和准层序组的边界为对比和编制沉积岩石图件提供了年代地层格架。层序、准层序和准层序组由地层的物理学关系限定和鉴别,这些关系包括单位边界的几何形状,纵向和横向叠置形式。绝对厚度、形成时的时间数量,以及区域或全球的成因解释都不用来限定层序地层学的单位。

层序及其组成地层的形成与海平面变化速度、沉降速率和沉积物供给速率之间相互作用有关。准层序和准层序组是层序的基础结构单元。准层序是成因有关的层或层组的相对整合的序列,以海洋淹没面及其相关面(correlative surfaces)为界。硅质碎屑的准层序是进积的,因而向上变浅。碳酸盐的准层序普遍是加积的,也是向上变浅。海洋淹没面是分开新、老地层的面,横穿它海水突然变深。随着这种变深普遍有较小的海底侵蚀(但没有陆上侵蚀和向盆地的相迁移)和无沉积作用及小的间断。如果海洋淹没面与层序界面不一致,则海洋淹没面上的上覆地层便不会出现上超。海洋淹没面是一平坦面,一般仅几英寸至 10 英尺的小地形起伏,以几英尺者最为普遍。海岸平原中和陆棚上一般都有海洋淹没面的相关面。由于河流的复活、海岸上超的向下迁移和相向盆地迁移,使海岸平原中的相关面既无明显大的陆上侵蚀,也无上覆地层的上超。但由于河流的作用及小的陆上暴露,海岸平面中的相关面可以局部侵蚀作用为标志。横切相关面的地层的相分析,一般反映不出水深的很大变化。海岸平原中或陆棚上的相关面,通常仅能从海洋淹没面沿倾斜相对向上或向下来加以鉴别。

准层序组是与成因有关但叠置方式不同的准层序系列。在许多地方,准层序组的界面是主要海洋淹没面及其相关面,这些界面:(1)分隔不同的准层序叠置型式;(2)可与层序边界面一致;(3)可以是下超面和体系域的界面。准层序组中的准层序叠置方式有进积的、退积的和加积的(图 1),这取决于沉积速率与调节速率(accommodation rates)之比。这些叠置方式在一个层序内是可以预测的。

一个层序是与成因有关的相对整合的地层序列,以不整合及其相应的整合面为界面。沿不整合面有陆上侵蚀的削蚀作用特征(有些地方有相应的海底侵蚀)或陆上暴露,反映出有大的间断。沿整合面则没有侵蚀(海下和陆上)和无沉积特征,没有大的间断。整合面包括其

上沉积作用极为缓慢,以极薄的沉积物代表很长地质时期的面。

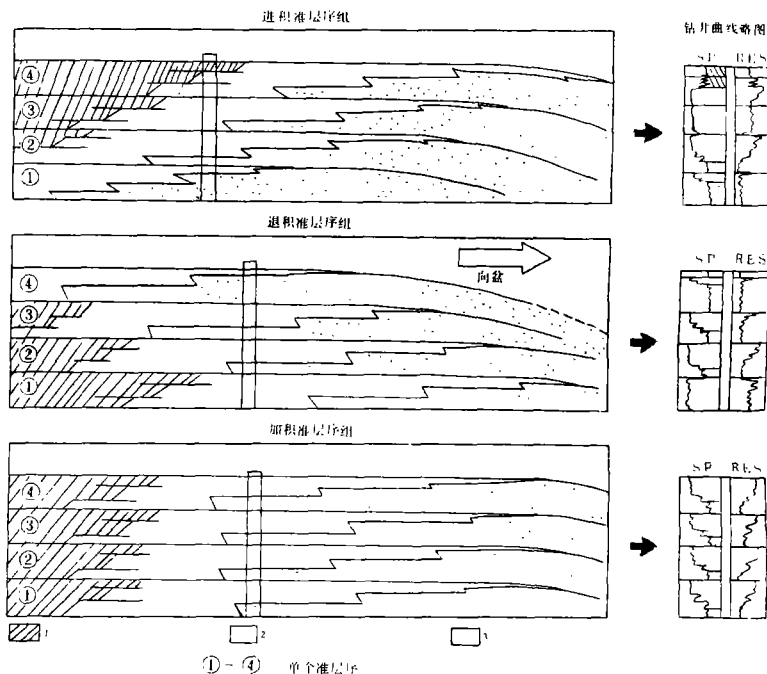


图1 准层序组中准层序的叠置类型 (据 J. C. van Wagoner 等, 1988)

正如前面所述,层序是层序地层学研究的基础,因此对层序的基本概念必须反复说明,现再一次将其综合为图2。

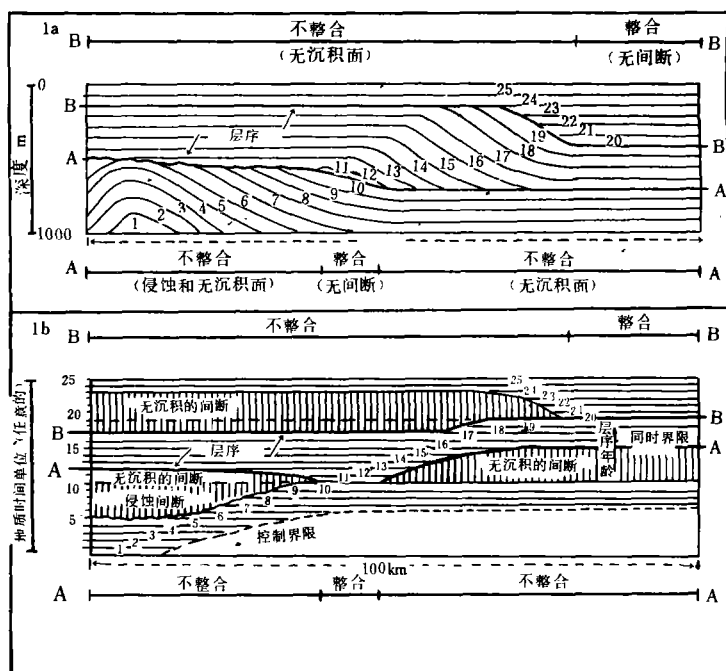


图2 沉积层序的基本概念

1a 一个层序的综合地层剖面;
1b 一个层序的综合年代地层剖面

三、层序内地层与界面的关系

层序内地层与层序不整合边界面的关系,是层序地层学研究特别重要的内容。不整合面(地震剖面中的不整合一反射)可以是侵蚀成因的(削截),也可以是沉积造成的(超失)。

超失(lapout)是指地层在其原始沉积面的侧向终止。这种终止是由沉积作用造成的,包括上超、下超和顶超(图 3)。削截(truncation)也是指地层对原始沉积面的侧向终止,但它是由于侵蚀作用使已沉积的地层在横向上消失的结果,可作为侵蚀沉积间断的证据。

底超(baselap)是沉积层序底界面超失,它包括两种类型(图 3)。上超(onlap)系水平地层对原始倾斜面的超覆尖灭,或者是原始的倾斜地层对原始倾角更大的的斜面向倾斜上方作超覆尖灭。下超(downlap)系原始倾斜地层对原始水平面或沿倾斜面的倾斜下方作底部超覆。

顶超(toplap)是沉积层序顶界面的超失,原始的倾斜地层(如前积层)及原始斜坡沉积均可出现此种接触关系。

Vail 等(1977)认为:海岸上超表示海平面相对上升;顶超表示海平面静止;海岸上超向下迁移表示海平面相对快速下降。

海岸上超是海岸(近海)岩相的向陆终止,它是由以下原因之一造成的:(1)当盆地下沉或(和)保持静止的海平面上升,或海平面上升比盆地上升速率大;(2)海平面保持静止而盆地下降;(3)海平面下降,但盆地沉降速率更大。在一次海平面相对上升(海岸上超)期间,海岸线的迁移是海平面变化、盆地沉降和沉积物供给等的函数,可发生三种情况:岸线的海进、海退或静止。例如,海平面相对上升(滨海沉积上超)时,如果陆源沉积物供给量较少,则岩相带向陆迁移,表现为海进层序,岸线向陆;如果此时陆源沉积物供给量较多,甚至过多,则岩相带和岸线向陆迁移,剖面上表现为海退层序。

顶超是海平面相对静止的标志,它意味着盆地沉降与绝对海平面在一个前积期基本保持稳定。显然,顶超是斜交前积作用的结果,所以可推断前积大概是快速的并受三角洲沉积的影响。由于三角洲或其它前积的海岸体系的加积不能高于海平面数米,形成顶超就必须要求正常沉积环境向盆地方向迁移。前积速率将受沉积物供给、水深和海平面下降稳定性的控制。

海岸上超的向下迁移表示海平面相对快速下降。在下列条件下便会出现海岸上超向下迁移:(1)当盆底上升、保持静止或以比海平面变化更低的速率下沉时,绝对海平面下降;(2)盆底上升时海平面保持不动;(3)海平面上升,但盆底以更大的速率上升。图 4 表示海岸上超向下迁移的原理。海岸上超向下迁移的量度是从一个层序上超终止的最高位置到下一个叠覆层序的终止点。

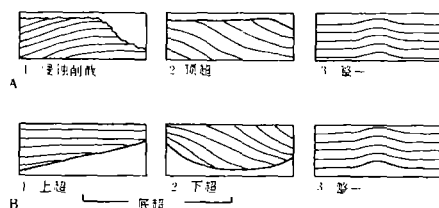


图 3 层序内地层与层序边界的关系

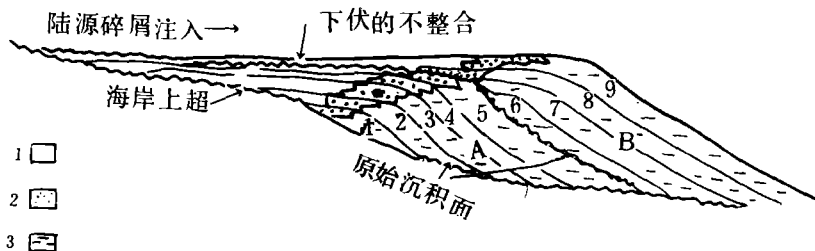


图4 海岸上超向下迁移说明海平面下降(据 Vail 等, 1977)

1-非海相海岸沉积; 2-滨海沉积; 3-海相沉积

四、层序类型及其界面

岩石记录中有两类层序, 即类型 I 和类型 II。两者的主要区别在于底界面, 分别称为类型 I 界面和类型 II 界面。

类型 I 界面(图 5、6)的特征是: 具陆上暴露和与河流复活相伴的同时的陆上侵蚀作用、相向盆地迁移、海岸上超向下迁移、上覆地层的上超。相向盆地迁移的结果, 使非海相或极浅水相的岩石(如层序界面上的辫状河砂岩或河口湾砂岩之类)可直接盖在较深水海相岩石之上(如界面之下的陆棚泥岩和下临滨砂岩), 而没有沉积于中等深度环境的岩石插入其间。

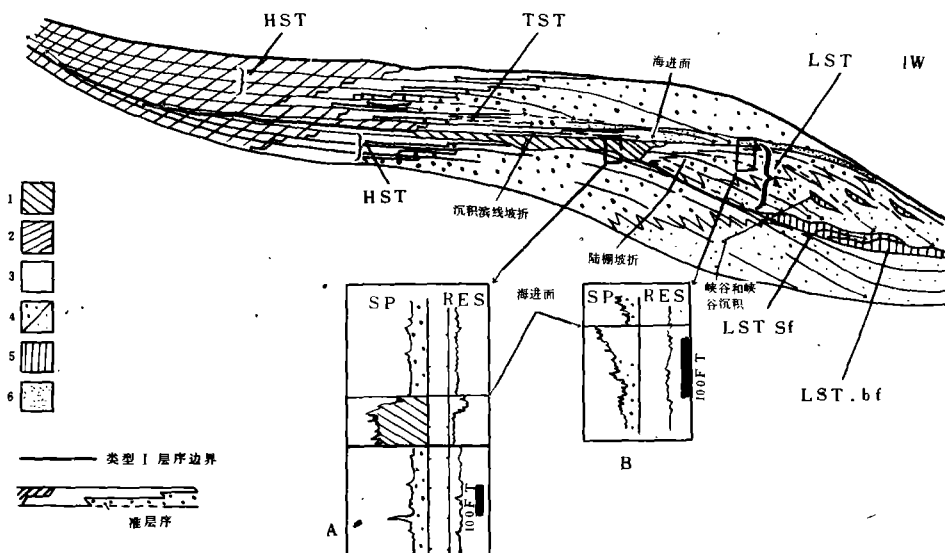


图5 沉积于具陆棚坡折盆地类型 I 层序中的地层 (据 J. C. van Wagoner 等, 1988)

1-深切谷中河流或河口湾砂岩; 2-海岸平原砂岩和泥岩; 3-浅海砂岩; 4-陆棚和斜坡泥岩及薄砂岩;

5-海底扇和天然堤水道砂岩; 6-凝缩层;

HST-高位体系域, 加积至进积准层序组; TST-海进体系域, 退积准层序组; LST-低位体系域;

IW, Sf, bf-分别为低位体系域的低位楔、斜坡扇、盆底扇

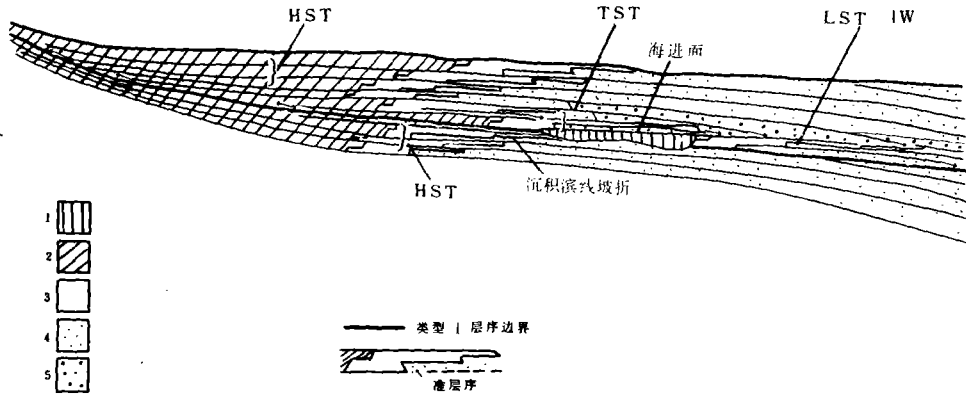


图 6 沉积于具缓坡边缘盆地的类型 I 层序中的地层(据 J. C. van Wagoner, 1988)

图例 1、2、3、4 及图注同图 5, 5-凝缩层

在沉积滨线坡折(depositional-shoreline break)的海平面下降速率超过盆地沉降速度,海平面相对下降时,便形成类型 I 层序边界。沉积滨线坡折位于陆棚上,由它向陆,沉积表面接近或在基面(base level)上,通常是海平面;由它向海,沉积表面低于基面。滨线坡折约略与三角洲内河口沙坝的向海端一致,或与海滩的上临滨一致。以前发表的文章中,曾把沉积滨线坡折作为陆棚边缘(shelf edge)。在许多盆地中,沉积滨线坡折可是 160km(100 英里),或是陆棚坡折更向陆的位置,其标志是陆棚坡折向陆的均匀缓斜的陆棚(普遍 $<1:1000$)变为陆棚坡折向海的陡倾斜(一般 $>1:40$)陆棚。在另一些盆地,滨线坡折可能是陆棚坡折。

类型 II 界面(图 7),以陆上暴露和沉积滨线坡折向陆的海岸上超向下迁移为特征,但它没有与河流复活伴生的陆上侵蚀和相的向盆地迁移。沉积滨线坡折向陆的上覆地层的上超也是类型 II 层序界面的标志。当海平面下降速率低于沉积滨线坡折处盆地沉降速率时,便形成类型 II 界面,此时,在该海岸位置海平面无相对下降。

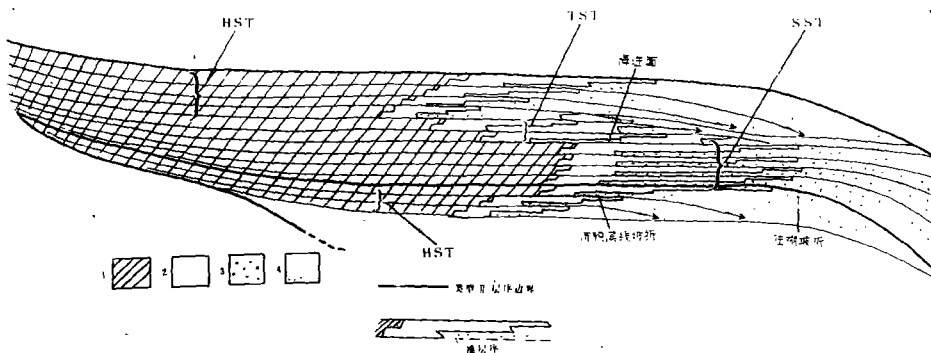


图 7 类型 II 层序中的地层(据 J. C. van Wagoner, 1988)

1-海岸平原砂岩和泥岩, 2-浅海砂岩, 3-陆棚和斜坡泥岩, 4-凝缩层

SST-陆棚边缘体系域, 微进积至加积准层序组, 其余图注同图 5

五、沉积体系域及其特征

沉积体系(depositional system)是岩相的三维组合。体系域(system tract)是同时的沉积体系联合。每类层序中都划分了三种体系域。类型Ⅰ层序中为:低位、海进和高位体系域;类型Ⅱ层序中为:陆棚边缘、海进和高位体系域。

体系域是据层序中的界面类型与其位置,以及准层序和准层序组的叠置型式来客观地确定的,它也以相组合和几何形状为特征。在推测体系域时,低位、高位等术语不是指海平面或海平面变化旋回中的独特时期或位置。体系域开始的时间是海面变化、沉积物供给和构造活动间的相互影响的函数。

直接盖在类型Ⅰ层序界面上的最低体系域称低位体系域(图5、6),但直接在类型Ⅱ层序界面上的称为陆棚边缘体系域(图7)。

沉积在具陆棚坡折盆地内的低位体系域一般可分为三个分开的单元(图5):盆底扇、斜坡扇和低位楔。盆底扇是盆底或下斜坡上的海下扇,其形成与斜坡上峡谷的侵蚀作用和河谷深切至陆棚有关。硅质沉积物经峡谷和海下峡谷而越过(bypass)陆棚和斜坡,供给盆底扇物源。盆底扇的底(与低位体系域的底一致)是类型Ⅰ层序界面;扇顶是一下超面(downlap surface)。海平面相对下降时期出现盆底扇沉积、形成峡谷和出现深切谷的侵蚀作用。

斜坡扇以斜坡中部或底部的浊流和碎屑流沉积为特征,它可归并入盆底扇或低位楔的早期部分。斜坡扇的顶部是低位楔中部和上部的下超面。

低位楔以陆棚上深切谷充填为特征,它普遍超覆在层序界面上,以楔形逐渐沉积在斜坡上和普遍下超在盆底扇或斜坡扇上。低位楔沉积不归入盆底沉积,它由进积至加积和准层序组组成,其顶与低位体系域的顶一致,是一称为海进面(transgressive surface)的海洋淹没面。海进面是层序内穿过陆棚的第一个重要的海洋淹没面。低位楔出现在海平面缓慢的相对上升时期。

沉积在具缓坡边缘盆地内的低位体系域由含有两个部分的相对薄的低位楔组成(图6)。第一部分以海平面相对下降时河流深切和海岸平原的沉积物越过为特征。在此期间海岸线迅速向盆地推进,直至海面下降稳定为止。楔形体的第二部分以海平面相对缓慢上升、深切谷的充填及海岸不断推进为特征,导致低位楔的倾斜上部为深切谷充填物组成,倾斜下部由一个或一个以上进积准层序组组成。低位楔的顶是海侵面,底是较低的层序界面。

陆棚边缘体系域是类型Ⅱ层序的最下部体系域,其底是类型Ⅱ层序界面(图7)。它由一个或多个微弱进积至加积的准层序组组成。该组合在向陆方向上超在层序界面上,向盆地方向下超在层序界面上。此体系域的顶为海进面,它也是海进体系域的底。

海进体系域是类型Ⅰ、Ⅱ层序的中间体域(图5、6、7),以一个或多个退积准层序组为特征,其底是低位或陆棚边缘体系域顶部海进面。海进体系域内的准层序在向陆方向上超在层序界面上,在向盆地方向则下超在海进面上。海进体系域的顶是下超面。下超面也是海洋淹没面,上覆高位体系域中的推进斜坡的坡脚下超于上。该面标志着从退积至进积准层序组的改变,是最大的海洋淹没面。凝缩层或凝缩剖面(condensed section)主要出现在海进体系域或末端高位体系域内,它是一种以极缓慢沉积速率沉积的半深海或深海层组成的相,在滨岸的区域海进期间最为广泛。

高位体系域在Ⅰ、Ⅱ类层序中都位于上部,普遍广布于陆棚之上,可由一个或多个加积

的准层序组组成,其上则为一个或多个具推进斜坡形状的进积准层序组。高位体系域内的准层序组在向陆方向上超在层序界面上,在向盆地方向下超在海进体系域或低位体系域的顶面上。此类体系域的顶为类型 I、II 层序边界面,底为下超面。

体系域与海平面升降的关系如下:

低位体系域的低位扇是海平面迅速下降时期的沉积;斜坡扇是海平面下降后期或海平面上升早期的沉积;低位楔同斜坡扇。

海进体系域是海平面迅速上升期间的沉积。

高位体系域是海平面上升后期、稳定期和下降早期的沉积。

主要参考文献

L. F. 布朗, W. F. 费歇尔, 1980, 地震地层学解释与石油勘探, 石油工业出版社。

Sloss, L. L., 1988. Forty years of sequence stratigraphy. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 100, No. 11, pp. 1661—1665.

Vail, P. R. et al, 1977. Seismic stratigraphy and global changes of level. In: C. E. Payton (Editor), *Seismic stratigraphy—Application to hydrocarbon exploration*. AAPG M 26, pp. 49—212.

Van Wagoner, J. E. et al, 1988. An overview of The fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In: C. K. Wilgus et al (Editors), *Sea-level changes, An integrated approach*.

(上接 22 页)

主要参考文献

吴贤涛, 豫西济源—义马盆地浊流沉积中的痕迹化石及其环境意义, 沉积学报第 3 卷第 3 期, P. 23—31.

吴贤涛, 1986, 痕迹学入门, 煤炭工业出版社。

吴贤涛、胡斌、王观忠、张国成, 1986, 苏南皖东五通群观山组的近岸风暴沉积与潮道沉积, 石油实验地质, 第八卷第四期, P. 351—361.

吴贤涛、胡斌、王观忠、张国成, 1987, 豫西焦作地区上石炭统浅海碳酸盐岩中的风暴沉积, 沉积学报, 第五卷第 4 期, P. 1—17.

杨式溥、宋志敏、梁定益, 1982, 西藏阿里(狮泉河—多玛)地区中侏罗—早白垩世复理石相遗迹化石, 地质学报, 第 56 卷第 4 期, P. 302—313.

杨式溥、宋志敏、梁定益, 1983, 西藏阿里地区晚石炭世—早二叠世复理石相遗迹化石, 地球科学, 第 2 期(总 19 期), P. 93—103.

杨式溥, 1986, 我国浊流复理石相的遗迹化石及其古生态和古环境, 中国古生物学会第十三、十四届年会论文集, 安徽科学技术出版社, P. 143—166.

杨式溥, 1988, 青海果洛、玉树地区二叠纪和三叠纪复理石相遗迹化石, 沉积学报第 6 卷第 1 期, P. 1—11.

孟祥化、乔秀夫、葛铭, 1986, 华北古浅海碳酸盐风暴沉积和丁家滩相序模式, 沉积学报第 4 卷第 2 期, P. 1—18.

夏邦栋、吕洪波、熊斌辉、何永明、胡宝生, 1987, 浙江开化上奥陶统复理石中的环形迹, 沉积学报第 5 卷第 2 期, P. 74—79.

Crimes, T. P., Goldring, R., Homewood, P., Stuijvenberg, J. V. and Winkler, W., 1981. Trace Fossil Assemblages of Deep-sea Fan Deposits, Gumigel and Schlieren Flysch (Cretaceous—Eocene), Switzerland. *Echegae Geol. Helv.*, Vol. 74/3, pp. 953—995.

Ekdale, A. A., Bromley, R. G. and Pemberton, S. G., 1984. *Ichnology: The Use of Trace Fossils in Sedimentology and Stratigraphy*. SEPM, Tulsa, Oklahoma.

Kiszkiewicz, M., 1970. Observations on the Ichnofauna of the Polish Carpathians, In: Crimes, T. P. and Harper, J. C., Eds. *Trace Fossils I*, Seel House Press, Liverpool, pp. 283—322.

Seilacher, A., 1967. Bathymetry of Trace Fossils. *Marine Geology*, 5, pp. 413—428.