

# 露头层序地层学

李文汉

(成都地质矿产研究所)

## 一、问题的提出

层序地层学与其他地层学分支学科的最大、最根本的不同,就是不对地层进行逐层(bed)的研究,而是对沉积体系和沉积体系域进行三维的研究。为此,它十分强调和重视地震勘探、钻井等在地层的沿厚度方向所取得的物性资料。甚至把这些物性资料称为划分和建立层序的根本也不为过分。何况层序地层学本身也就是在地震地层学的基础和有关概念或基本理论上发展起来的。既然如此,为什么要强调露头的层序地层学研究呢?

首先,世界上许多国家,尤其是幅员辽阔的国家,不管其科学技术如何发达,就其领土范围内而言,地表露头总是远远地多于其钻井(包括一切地球物理学钻井)。通过钻孔或测井所得的数据虽然十分珍贵,但总是“一孔之见”,与绵延数十、甚至数百公里的地表露头相比,相差何止几个数量级。因此,从取得资料的广度而言,强调地表露头的层序地层学研究是不言自明的。

其次,所有的钻孔、测井都受分辨能力的限制,以地震波为例,许多细小的地层间断和相的间断就不能分辨。有的不整合,即使生物地层学的资料已经很肯定它的存在,但地震波就可能分辨不出来。而在地表露头上,所有的层序及层序边界特征都暴露无遗,且“一目了然”。由于地表露头的广延性和高分辨性,研究者就可以用地层学的、地球物理学的、古生物学的以及古地磁学的各种各样方法来研究它们,这不仅使综合层序地层学成为可能,而且使层序地层学更具可信性和可行性。

第三,尽管所有钻孔、测井取得的数据、图象等都是地层物性的真实反映,但它们不是地层本身,而是要研究者去解释和判断这些数据或图象之后,才能认识或了解地层的特性或特征。这当中,不可避免地要出现“解的非唯一性”这一老问题,更何况不同的研究者可能有不同的解释和判读原则。与之相反,在地表露头上可直接观察和研究地层,因此其真实性要大得多,或者说,层序及层序界面的特征在地表露头上是见得着、摸得到的。

第四,众所周知,钻孔和测井是要投入大量资金的,而且由于各部门间的有关规定,并不是任何人都可索得这些资料的;在国外,则有所谓专利的问题。地表露头不存在上述问题。

必须特别说明的是,对层序地层学学科而言,仅仅研究地表露头是不够的,而且露头的层序地层学研究是有局限性,这主要表现在以下几个方面:

(1) 在单一地表露头中见到的只是该层序的一小部分。沿地表地质剖面方向, 观察到的只是层系在纵向的变化和特征; 沿地层走向的追索和观察, 只能了解岩相或沉积体系域的侧向变化和特征。如果要从三维来研究层序和体系域, 特别是把层序界面作为等时面而不是一条等时线来研究和对待, 那么就必须了解岩层在倾斜方向的变化和特征。要做到此点, 除某些特殊的地区外, 只能依靠钻孔或测井的资料。因此, 一个或数个露头的层序地层研究, 难以正确确定层序界面, 以及层序内地层与界面的关系。

(2) 有些界面在露头上很难划分, 特别是层序界面上、下地层是整合的地区。另一方面, 并非所有在地层露头上观察的间断都是层序界面, 例如层序中的海进面、冲刷面、硬底等也可能以沉积间断的形式出现, 但它们只是划分准层序或体系域的界面。

(3) 为了正确进行大区域的层序地层学的对比, 极其重要的是对比具相同地层学和沉积学意义的沉积要素, 以及建立辨别层序各种界面的标准。这就出现了人为因素, 例如, 不同的研究者可主观地选择不同的不整合在相同盆地中进行对比, 甚至不用相同的原则来进行层序界面的选择, 这些人为的差别, 在露头研究中屡见不鲜, 更为麻烦的是, 不同的研究者从同一露头得出完全截然相反的结论。

## 二 正确鉴别层序的界面

层序地层学中常提及的界面有层序界面、海洋淹没面、基面、最大饥饿面等等。在层序地层学的露头研究中, 应特别注意层序界面、海进面(第一次海洋淹没面)和最大饥饿面(最大海洋淹没面)的鉴别, 因为它们间有根本不同的概念和地质含义。简单地说, 层序界面是指层序与层序之间的分界面, 它们的形成与海平面迅速下降有关; 海进面, 出现在深切谷充填物的顶部, 是海进体系域与其下伏的低位体系域或陆棚边缘体系域的分界面, 形成于海平面上升期间; 最大饥饿面, 是饥饿层的顶面, 分隔了海进体系域和高位体系域, 它是海平面在该升降旋回中上升到最高点期间形成的。以下将对这些面作进一步的讨论。

### (一) 层序界面的鉴别

#### 1. 基本认识

层序边界面常简单地称为层序界面, 它与沉积层序内的海洋淹没面、下超面等界面不同, 是指层序与层序之间的不整合面及相关的整合面。层序界面也不同于大地构造学中的构造层的界线或异地(或外来)地层单位的界线。因为层序界面是由海平面下降形成的, 它可通过不整合之外的相关整合而予以鉴别; 构造层只能在由构造活动造成的不整合处予以鉴别; 异地地层单位只能在变形的地方才能鉴别。

在区域填图中, 不整合面是易于辨认和易于追索的面。但在层序地层学研究中, 特别重视的是不整合面在倾斜方向的变化, 尤其是该不整合面的相关整合面在哪里? 这是因为: 首先, 不整合面沿倾斜方向的变化代表该时间沉积盆地从海岸至深水部分的变化, 这是建立沉积体系和恢复古沉积环境的基础; 其次, 虽然不整合面不代表绝对时间线, 但它们可通过相关的整合面的古生物而确定时代, 从而可得出沉积层序的时代, 甚至可通过整合面的地球物理学和地球化学的研究得出层序界面及沉积序列的绝对年龄。

层序界面的不整合部分在露头上最明显的特征是: 上、下地层的角度不整合、河流的深切谷, 或较小的侵蚀面以及非常发育的生物潜穴、钻孔等。在碳酸盐岩地区, 不整合的

最明显特征是喀斯特的发育。

层序地层学的基本观点之一是:全球海平面变化是曲线性的,而且接近于正弦曲线。虽然真正的海平面变化不是正弦曲线,但海面变化曲线可通过一系列的正弦曲线进行分解。这一基本观点意味着沉积的地层型式直接与正弦曲线的拐点有关,从而把沉积层序定义为两个相邻的下降拐点之间的沉积;也意味着层序间的界面只限于形成下降拐点附近的界面。而在下降拐点附近海平面变化有两种不同的情况,所以层序界面分为类型 1 和类型 2 两种,当然它们在露头上的特征也是十分不同的。

## 2. 类型 1 层序界面的特征

在海面下降时期,由于沉降率、沉积速率、沉积物供给等因素的影响,沉积滨岸坡折处的海平面下降率超过该处的沉降率,使得海平面可下降至原有的陆棚坡折之下。在这种条件下形成的类型 1 层序界面有如下基本地质特征:

(1) 该界面有明显的陆上暴露特征和标志。由于海平面可降至陆棚坡折以下,因而在下伏层序的陆棚沉积物之上或为陆上暴露面,或为近岸的沉积面。

(2) 界面上有复活的河流相沉积,以及与河流相伴的侵蚀作用造成的沉积单元,如深切河谷及其充填物。

(3) 如图 1 所示,界面上的沉积相,相对下伏的沉积相而言,向盆地迁移。表现为浅水环境沉积或陆相沉积直接覆盖在较深水或深海沉积相之上,二者之间没有过渡环境的沉积。

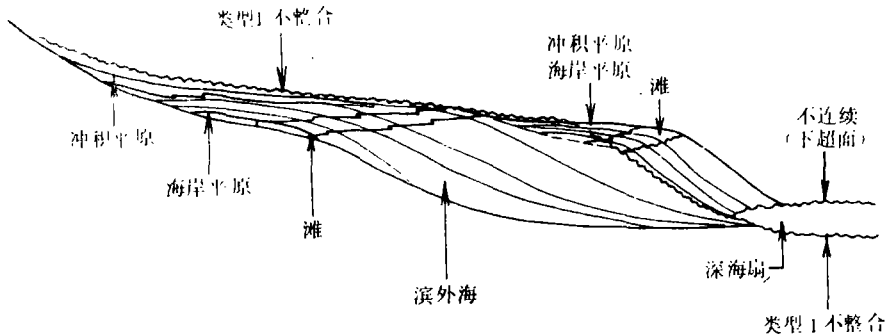


图 1 类型 1 界面及相关沉积相 (据 Posamentier 等, 1988)

(4) 界面之上的沉积层与界面表现为超覆不整合,按层序地层学的术语为上覆地层的上超。

(5) 在盆地位置,类型 1 界面之上应沉积点源的深海扇。

## 3. 类型 2 层序界面的特征

类型 2 界面虽与类型 1 界面一样,也形成于海平面下降阶段,但不同的是类型 2 界面形成时的海平面下降率低于沉积滨岸坡折的沉降率。因此,此时的陆棚大部或全部未露出水面,陆上暴露标志和特征仅见于沉积滨岸坡折的向陆部分;也没有与河流复活相伴的侵蚀作用和明显的沉积相的向盆地迁移。图 2 表明了类型 2 界面的基本特征和相关沉积相叠置的一般形式。在图 2 上可看出此类界面的另一明显特征,即沉积滨岸坡折向陆方向的海岸上超的向下迁移。

类型 1 和类型 2 界面的地质特征尽管差别很大,但在露头上不是易于辨别的。为了正

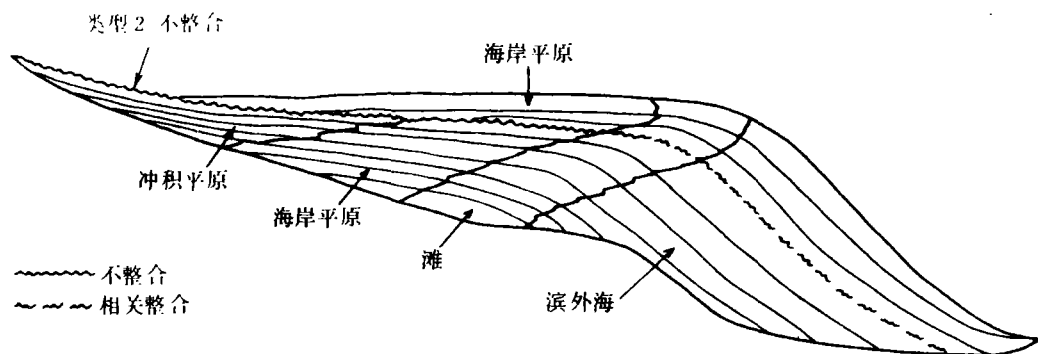


图2 类型2界面及相关沉积相 (据 Posamentier 等, 1988)

确地鉴别它们,不仅要作区域范围的追索和填图,而且要对每个露头或每条剖面作较为详尽的沉积学研究,特别是要作准确的沉积相划分。这是层序地层学与其它地层学学科十分不同的地方。

## (二) 海进面的鉴别

层序地层学研究中常见的术语之一是海洋淹没面及其相关面。海进面也是海洋淹没面,不过它是同一层序中最早的一个海洋淹没面,也就是说它是低位体系域和海进体系域之间的界面。

在形成层序界面之后,海平面仍处于下降阶段,此时沉积低位体系域。当海平面下降至其最低点时,也就是习惯说的达到最大海退时,盆地的可容空间达到最小值,陆源沉积物向盆地分布的界限达到最大值。此后,随海平面的上升,可容空间将不断增加,岸线将逐渐向陆地方向迁移,也就是习惯说的海进开始。在海平面变化旋回中,海平面下降至最低或开始上升时所形成的界面就是这里所说的海进面。

海进面在露头研究中,也是较易识别的一个界面,常见的特征:

(1) 海进面上下的沉积物明显不同。界面之上的海相沉积物覆于非海相、滨岸相以及深切谷充填沉积物之上。就沉积相研究而言,这是一个沉积相突然跳动的一个界面。在生物地层学和区域填图中常将海进面作为阶或相当地层单位和填图单位的界面。

(2) 由于海进面形成于海进期间,所以海平面不断升高、可容空间不断增大,海水向陆地方向扩展,淹没原有的海岸平原,甚至河间地区,从而造成一种冲刷面。这种冲刷面——海进面如果是形成于类型2层序中,则与下伏的类型2界面的不整合部分一致。形成这种一致的原因是:形成类型2界面时,陆棚几乎未暴露,没有河流复活及深切谷沉积,界面上的滨岸部分几乎没有沉积,可以与紧接其后的海进面重叠一致。从理论上讲,海进面与层序界面是极易区分的,但在实际研究工作中确需作大量细致的调查、追索,尤其是上述重合一致的部分,更是层序地层学研究中常争论的老问题。

(3) 海进面有丰富的生物潜穴、钻孔。

(4) 海进面是高能近岸环境在下伏地层之上向陆迁移(海进)的基面。因此,它的上下地层的堆积型式是十分不同的。它的下伏地层是海平面下降阶段的产物,所以是进积的准层序或准层序组,是一种向上变浅、变细的序列;上覆地层是海平面上升阶段的产物,因而是退积的准层序或准层序组,是一种向上变深、变细的序列。

## (三) 最大饥饿面的鉴别

当海平面上升到海面变化旋回的最高位置时,海水向陆扩展到最大值,也就是说达到了最大海进,此时形成了最大海洋淹没面。由于它与凝缩层(或称凝缩剖面、饥饿层等)紧密相关,所以称为最大饥饿面。

显然,形成最大饥饿面时凝缩层向陆推移至最远位置。以后,海平面又将开始缓慢下降,并堆积高位沉积。可以最大饥饿面是海进体系域和高位体系域之间的界线。

由于凝缩层具有独特的岩石学、矿物学、古生物学以及地球化学方面的特征,因而凝缩层及与其密切相关的最大饥饿面是容易辨别的(凝缩层特征下文将再讨论。)除此之外,最大饥饿面尚有以下特征:

(1) 最大饥饿面主要为生物潜穴的沉积小间断面和有丰富生物钻孔的海洋硬底。

(2) 下伏的较浅水或浅水沉积,以及与海进沉积物相伴的底栖动物群至此面突然消失。紧接其上的是深水或较深水沉积物,及与之伴生的浮游生物等较深水环境的动物组合。

(3) 沿最大饥饿面的倾斜方向追索,在向盆地方向,其岩相和动物群的变化显示有一种突然变深的事件;向滨岸方向,有时它与滨岸地区的不整合混淆一起,这时它与上述海进面的情况一样,也是层序地层学研究中一再争议的问题。

### 三、区分不同类型的沉积层序

沉积层序是层序地层学的基础单位。根据底部界面的不同而分为不同类型的层序,即底部为类型 1 界面时属类型 1 层序;底部界面为类型 2 界面时属类型 2 层序。由此可见,区分不同类型的沉积层序的关键是辨别层序界面的类型。但是,在露头的层序地层学研究中,仅仅研究层序界面是不够的,因为层序界面只是沉积层序的一个部分,何况层序界面的鉴别除上述的特征以外,也离不开上覆、下伏沉积体系域的研究。例如,如果界面之上是低位体系域,那末其底部界面就一定是类型 1 界面;如果是陆棚边缘体系域,其底部界面就必须是类型 2 界面。这样,正确划分沉积体系域也就成了区分不同类型沉积层序的重要组成部分。

不同类型的沉积层序,其组成是不同的。一般说来,类型 1 层序由以下几部分组成:底部为类型 1 界面,向上依次为低位体系域、海进面、海进体系域、具最大饥饿面的凝缩层、高位体系域,顶部为类型 1 或类型 2 界面(是另一层序的底界面)。类型 2 层序从底至顶由以下几部分组成:类型 2 界面、陆棚边缘体系域、海进面、海进体系域、具最大饥饿面的凝缩层、高位体系域。二者的根本区别在于底部界面和底部沉积体系域的不同。

所谓沉积体系域是指同时的沉积体系的联合,而沉积体系是指岩相的三维组合,这些岩相在成因上与现代正接受沉积的或古代推测的沉积过程和环境有联系。由此可见,露头的沉积体系域研究其实质是露头的沉积相研究,只不过在层序地层学中更强调进行三维的研究,这大概也是沉积学研究者,特别是岩相古地理学研究人员易于接受和大力推崇层序地层学的原因。

不同的沉积体系域形成于海平面变化旋回的不同阶段,由不同的沉积单元或沉积相组成(李文汉,1989)。限于篇幅,本文只对沉积体系域的部分沉积单元(或相)作简略的讨论,更多的部分应参考沉积相和沉积环境的专门文献。

低位体系域一般可分为三个单元: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。斜坡扇以斜坡中部或底部的浊流和碎屑流沉积为特征,它可归入盆底扇或低位楔的早期部分。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,其顶部为海进面。这是低位体系域中最具特征和最为意义的部分。因此,在露头研究中应注意深切谷充填相的鉴别和研究。一般说来,充填深切谷的沉积物由河流、河口湾及海砂的复杂体系组成。最近源的深切谷充填相以辫状河至河口湾沉积的复杂岩相为特征;远源部分以从深水或较深水相至滨岸相的向上变浅序列为特征。深切谷充填相内的地层叠置型式表现为强烈的加积准层序。

陆棚边缘体系域内的地层叠置型式以进积准层序逐渐减少,加积准层序逐渐增多为特征。本体系域内的地层与底部类型2界面的接触关系,在向陆方向为超覆不整合,在向盆地方向为退覆不整合。由于陆棚边缘体系域是海平面开始上升之后的沉积,因而在沉积相的垂向叠置上表现为以非海相逐渐变为海相,也就是向上变深、变细序列。在海平面上升的同时,陆棚的新增可容空间逐渐增大,因此陆棚的很大部分可能被半咸水淹没,所以在靠近陆棚边缘体系域的顶部常有广布的煤系。

海进体系域是海平面上升率向最大值增加阶段的产物。在此期间可容空间增加率大大超过沉积物的进入盆地的量,因此滨岸线迅速向陆地方向移动,而在向盆地方向陆源组分便越来越少,以致盆地逐渐变为饥饿盆地。这样,沉积于海进面之上的海进体系域便有两种不同的组合形式:在向陆方向,由于沉积陆源沉积物的位置迅速穿过陆棚,因而沉积了一系列横向广泛的近岸沉积物,其纵向特征是总的向上变深和陆源沉积物量减少;在向盆方向,则以凝缩层的发育为特征。有关凝缩层的情况下文将作讨论。

高位体系域是沉积层序的最上部,其形成于海平面变化旋回曲线的上升拐点至下降拐点之间的那个期间。上升拐点之后,海平面上升至其高位,然后开始缓慢下降,这个阶段在沉积物上反映为从滨岸海进沉积逐渐变为滨岸海退沉积,在纵向上则以进积准层序叠置类型逐渐增多为特征。此体系与陆棚边缘体系域的最大不同在于顶部有广泛发育的河流沉积。另外,高位体系域的顶界为类型1或类型2界面,由于两类层序界面的特性不同,因而对下伏的高位体系域便有不同的侵蚀和影响,这在鉴别层序界面部分已有交代,不再赘述。

#### 四、加强对凝缩层的研究

露头的层序地层学研究中凝缩层具有十分重要的意义,主要是:(1)由于凝缩层的独特的岩石学、矿物学、地球化学等的独特特征,在野外易于识别,因此它是层序地层学研究和区域地质填图中的标志层;(2)凝缩层间为整合接触,其中含有丰富的生物化石,是确定层序及层序界面年代的主要依据。

凝缩层是薄的海相地层单位,由深海至半深海沉积物组成,以极低的沉积速率为特征。在滨岸的最大区域海进时分布范围最大,层虽薄但连续性好。此外,凝缩层含有丰富的和各种各样的浮游生物和底栖生物的组合;有大量的生物矿物,主要为海绿石、磷酸盐、菱铁矿等;有机质也很丰富。

凝缩层的地球化学特征也是十分独特的。由于缺乏陆源供给物,形成盆地的“饥饿”状况,因而随海平面上升,饥饿层(或凝缩层)向陆迁移的同时,盆地的碳酸盐补偿而

(CCD) 向上移动, 氧的最小值也向上迁移, 而方解石的  $\delta^{18}\text{O}$  也变得更负。凝缩层中十分丰富的自生球粒状海绿石, 便是在氧最小值向上运移这种特殊地球化学条件下形成的。另外, 凝缩层中的所谓外来元素(如铀)浓度很高。根据以上特点, 在研究海洋缺氧事件时, 凝缩层肯定是最主要的研究对象。

在碳酸盐地区, 由于水深与盆地海洋生物的碳酸盐生产率之间的强烈关系, 加之缺乏陆源沉积物, 因此凝缩层常仅仅是以双壳类生物为主的、海绿石化或磷酸盐化的最大饥饿面。而且, 碳酸盐地区的凝缩层所代表的时间要比相等的碎屑沉积的凝缩层所代表的时间要长。

## 五、小结

对于层序地层学之类的新兴学科, 仅用一篇较短的论文来探讨其工作方法必然是“挂一漏万”。但是必须研究和追索层序的各种界面; 对剖面进行沉积学研究以了解各类层序的组成——沉积体系域; 追索和研究特殊区域标志层——凝缩层, 这三项工作则是露头的层序地层学研究中必不可少的环节。未作专门的层序地层学研究之前, 仅凭一般的地质学和沉积学的基础研究资料是难以得出准确的层序地层学的结论的, 这与未作专门古生物地层研究之前难以得出准确的生物地层学的结论一样。

复杂的自然界有繁杂的沉积环境组合, 因而有千差万别的露头和形形色色的沉积组合。本文与其它论文一样, 以一种最简单的模式、最基本的假说来讨论所论述的问题, 所以本文所讨论的层序地层学的露头研究, 主要是指对边缘海的碎屑沉积的露头的研究。

层序地层学的研究目前仍大多在地震剖面, 钻井剖面等地球物理学资料基础之上进行, 在地表露头上研究则处于起步阶段, 值得探索的方面还很多。故此文仅作“抛砖引玉”之用, 并希望能得到专家和同行的指正。

## 主要参考文献

李文汉, 1989年, 层序地层学基础和关键定义, 岩相古地理, 第6期。

C. K. Wilgus, et al (ed), 1988, Sea-level changes: An integrated approach, SEPM, Special Publication No. 42