

文章编号 :1000-0550(2000)02-0181-09

上扬子克拉通南缘中泥盆统一石炭系 高频层序及复合海平面变化^①

陈洪德¹ 彭军¹ 田景春¹ 侯中健¹ 覃建雄¹ 王约²

1(《油气藏地质及开发工程》国家重点实验室 成都理工学院沉积地质研究所 成都 610059)

2(贵州独山县国土资源管理局,贵州独山,558200)

摘 要 上扬子克拉通南缘中泥盆统一石炭系地层高频层序可以划分为三个级别,并与层序地层学术语可以对比:六级层序—韵律层,五级层序—准层序,四级层序—准层序组。不同级别高频层序的形成受米兰柯维奇驱动力引起的具不同周期和频率的复合海平面变化控制。克拉通边缘沉积环境中,低频海平面变化的上升阶段形成以淹没节拍为主的高频层序,而在停滞至下降阶段形成以暴露节拍为主的高频层序。所以,通过对不同特征的高频层序及垂向叠加的分析,可以求解低频海平面的变化。

关键词 高频层序 复合海平面变化 中泥盆统一石炭系 上扬子克拉通南缘

第一作者简介 陈洪德 男 1957 年出生 教授(博士生导师) 沉积学

中图分类号 P539.2 **文献标识码** A

1 前言

晚加里东运动后,扬子板块与华夏板块碰撞拼合成了统一的华南板块。在泥盆纪至石炭纪时期,川滇黔桂地区位于华南板块上,由扬子陆块、华夏陆块、钦防海盆三个构造单元组成^[1]。研究区位于扬子陆块上,属于上扬子克拉通盆地的南部边缘,向南经克拉通边缘断陷过渡到上扬子被动陆缘盆地。因此在上扬子克拉通盆地南缘,沉积过程稳定且连续,构造活动相当微弱,在中泥盆世—石炭纪发育一套滨岸至浅海碳酸盐台地以碳酸盐岩为主的沉积组合。其中泥盆系中统下部龙洞水组和大河口组发育石英质成分的碎屑岩;中统上部的屯上组、鸡泡组、宋家桥组、鸡窝寨组及上统的望城坡组和尧梭组均为碳酸盐岩。石炭系下统者王组、革老河组、汤耙沟组发育碳酸盐岩夹少量泥质岩、碎屑岩,祥摆组以碎屑岩为主,夹碳酸盐岩、泥质岩及煤层;旧司组、上司组、摆佐组及石炭系上统滑石板组、达拉组、马平组均发育碳酸盐岩。这一沉积组合是稳定构造背景条件下古海平面升降变化过程的产物,它准确而充分地记录了古海平面的升降过程,并且可与全球性海平面变化相对比。有关研究区泥盆纪和石炭纪层序地层划分,已有论文对此作了详细论述,可参阅。

在众多控制上扬子克拉通盆地南缘中泥盆统一石炭系地层层序发育的因素中,海平面变化则相对重要

得多,因为整个盆地构造活动相对稳定,多以碳酸盐沉积为主,仅有少量的陆源物质供给,海平面变化基本上控制了沉积相的形成和展布,不整合面和沉积间断面的发育和保存,也决定了地层层序发育的具体特征。因此海平面变化的研究是研究区地层层序划分、地层层序叠加状态、充填方式和恢复地层格架的有效途径,而实现这一途径的物质基础便是高频层序的识别和研究。如郑荣才等^[2]通过高频层序的研究,建立了川东黄龙组内部克拉通盆地碳酸盐岩层序地层模式;李祥辉等^[3]从分析高频旋回层序着手,建立了龙门山区泥盆纪地层层序的叠加样式。

上扬子克拉通盆地南缘中泥盆统一石炭系地层发育齐全,出露完整,露头分布连续,是研究高频层序的理想场所。本文以详细实测的该地区中泥盆统一石炭系剖面为研究对象,对其高频层序特征及其所反映的海平面变化进行了深入的研究。

2 高频层序概念及形成机理

高频层序的概念是由 Mitchum^[4]提出的,系指由四级或四级以上旋回形成的地层记录序列,它是有效容纳空间的函数。

层序的发育受海平面变化、构造沉降、物源和气候四大因素控制,但其主要因素是海平面变化及构造沉降。被动大陆边缘和克拉通盆地的长周期沉降速率较慢,一般为 1~25cm/ka,碳酸盐的生产和堆积速率常

^① 成都理工学院“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室资助项目(右江盆地层序充填动力学)的部分研究成果

超过盆地沉降速率,而海平面变化以高频率($10^4 \sim 10^5$ 年)及快速(10m/ka)变化为特点,因此,这些因素相互作用的结果就构成了旋回沉降作用,形成了受不同级次海平面变化控制的不同级别的旋回层序。识别地层剖面中不同级别的旋回层序可反馈低频率(二级、三级)与高频率(四级、五级、六级)海平面变化周期。七十年代以来,众多学者对高频率旋回层序的级别划分和时限进行了研究,认为海平面高频率振荡的时间跨度为 $0.01 \sim 1\text{Ma}$,其中四级旋回为 $0.1 \sim 1\text{Ma}$,五级旋回为 $0.05 \sim 0.1\text{Ma}$,六级旋回为 $0.01 \sim 0.05\text{Ma}$,以五级、六级旋回层序最为常见,它们的厚度一般为几十厘米至数米,故也称之为米级旋回,并且认为米级旋回层序是与米兰柯维奇天文旋回有关的高频率振荡海平面变化旋回过程的产物,为异旋回成因机制的旋回层序^[5]。

米兰柯维奇假说认为,对于地球上任一纬度,日照量是太阳常数(S_0)、偏心率(E)、地轴倾斜角度或称黄赤交角(ϵ)和岁差(ρ)这几个参数的函数。 S_0 的变化幅度小而较稳定,偏心率(E)是地球绕日椭圆形轨道之中其半焦距与半长轴之比,周期数为 0.1 、 0.4 、 1.29 、 2.03 、 3.40Ma ,分别称之为 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 ,偏心率的最大或最小时期,可引起日照量及季节的变化。地轴倾斜角度是倾斜的地轴与通过地球中心垂线间的夹角,它在几百年期间在 $22^\circ 02' \sim 24^\circ 30'$ 范围内变化,其周期大约为 0.041Ma ,斜度的大小影响着地球上不同纬度和不同季节的气候差异程度的大小,在极地地区气候差异更加明显。岁差(ρ)是地轴沿着通过地心的黄道面的法线缓慢而不停地作周期性圆锥运动,即地轴运动,其周期有 0.014Ma 、 0.028Ma 的极值,平均为 0.02Ma ,岁差周期决定了是近日点的夏天还是近日点的冬天,及它们的长短,导致地面接受太阳辐射能的强度差及周期,产生气候循环。上述这些天文因素的变化将造成日照量的周期性变化,因而又造

成极地冰盖消长的周期性变化,从而产生 $0.02 \sim 0.04\text{Ma}$ 、 0.1Ma 级别相互叠加的高频率振荡海平面变化旋回。当然,关于米级旋回层序的米兰柯维奇旋回成因机制还未得出圆满的结论。

根据前人的研究成果,旋回层序可以划分为不同的级别,每个级别均有明显的成因解释和时限(如下表1)^[6]。其中低频旋回主要受构造—海平面变化控制,高频旋回主要受冰川海平面变化控制。受岁差周期控制六级旋回的韵律,表现为两种不同单层的交互韵律,如页岩—灰岩,泥灰岩—灰岩、灰岩—白云岩、油页岩—白云质泥灰岩等。由两种以上不同单层组成的层群,是受偏心率(E_1)周期控制的五级旋回,在实际地层中它常由 $2 \sim 5$ 个韵律组成,表现为向上变浅或变薄变厚的准层序。在前人研究的旋回中,所描述更多的就是这种相当于 0.1Ma 的小旋回。由多个五级旋回组成的四级旋回是受偏心率(E_2)周期控制的,它由向上变浅变粗的准层序或顶上暴露的准层序组成。组成低频三级旋回的高频四级旋回的旋回率常因低频旋回的周期而不同,因此将四级旋回进行归并是必要的。一般认为,产于低水位期的加积—进积系列可称为四级进积巨旋回,产于海侵期的退积系列可称为四级退积巨旋回,产于高水位期的进积—加积系列可称为四级加积巨旋回。因此,每个三级旋回层序可由进积、退积及加积巨旋回或由退积—加积巨旋回组成,在退积巨旋回与加积巨旋回的转换处为相当于最大海侵期的低速沉积。

通过对贵州省独山地区中上泥盆统(层序8~层序17)和石炭系(层序1~层序10)剖面的精细露头地层研究,运用高频层序有关理论和研究方法,共划分出六级层序达1116个,中上泥盆统542个,石炭系574个;五级层序434个,中上泥盆统217个和石炭系217个;四级层序134个,中上泥盆统67个,石炭系67个,下面分别介绍各级层序的组成特征。

表1 层序与旋回级次的划分^[6]

Table 1 Division of the depositional sequences and cycle of sea-level Changes^[6]

沉积层序	旋回级别	时间/Ma	海平面变化的产生原因
超层序	一级	>100	泛大陆的形成与分裂
巨层序	二级	10~100	大洋中脊的扩张作用
层序	三级	1~10	洋中脊的变迁与大陆冰盖的生长和消失
准层序组	四级	0.4	偏心率(E_2)周期
准层序	五级	0.1	偏心率(E_1)周期
韵律层	六级	0.02~0.04	岁差周期、斜度周期

3 高频层序类型及特征

3.1 六级层序

六级层序主要为厚度在 0.5~1.0m 左右的韵律(层偶), 据组成韵律的岩石类型可划分成以下几种类型。

3.1.1 碳酸盐岩型

根据碳酸盐岩中的岩石类型还可细分成以下三种类型。

灰岩韵律: 以泥晶灰岩—生物碎屑灰岩、泥灰岩—生物碎屑灰岩、泥晶灰岩—粒屑灰岩三种互层类型最为普遍(图 1-a、b、c)。这在中上泥盆统、石炭系的各层序中均有发育, 尤其是泥盆系第 8 层序 TST, 第 17 层序 HST, 石炭系第 1 层序、第 3 层序 HST, 第 4 层序当中发育最为特征。形成于缓坡、台地、浅滩及潮下环境中。其组成特征都具有向上变浅、变厚、变粗。除此之外, 还有由不同岩石类型组成的十多种韵律类型, 如生物屑灰岩—白云质灰岩, 泥质灰岩或泥晶灰岩—礁灰岩或藻纹层灰岩, 泥质灰岩或生物屑灰岩—角砾灰岩等。剖面上还可以由同一岩石类型的单层厚度变化组成六级韵律。

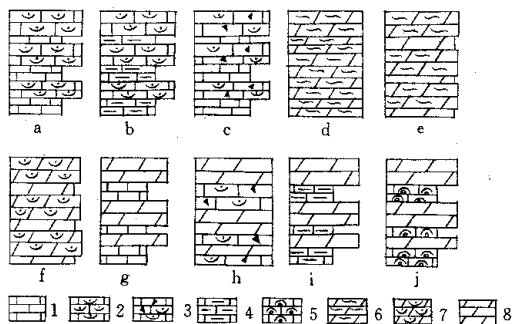


图 1 碳酸盐岩型六级旋回层序类型

1. 泥晶灰岩 2. 生物屑灰岩 3. 粒屑灰岩 4. 泥灰岩;
5. 礁灰岩 6. 藻纹层白云岩 7. 生物屑白云岩 8. 白云岩

Fig. 1 Carbonate rock types of sixth-order cyclic sequences

1. micritic limestone ; 2. bioclast limestone ;
3. grain limestone ;
4. marl 5. reef limestone 6. algal laminae limestone ;
7. bioclast dolostone ; 8. dolostone.

白云岩韵律: 根据白云岩的结构、构造、岩层厚度等可以成几种互层类型, 其中以藻纹层白云岩的厚薄互层韵律、中细晶白云岩—藻纹层白云岩、中细晶白云岩—生物屑白云岩这三种类型最为常见(图 1-d、e、f)。白云岩互层韵律主要形成于潮坪环境中, 均表示沉积水体向上变浅, 但岩层厚度和粒度可以向上变薄、变细, 也可以向上变厚变粗, 并且暴露标志特征明显。白云岩韵律主要分布在中上泥盆统的第 12 至第 17 层序

中, 石炭系层序中发育较少, 且主要分布于高水位体系域中。

灰岩—白云岩韵律: 由不同灰岩及白云岩岩石类型可以组成十二种互层韵律, 其中以泥晶灰岩—白云岩、粒屑灰岩—白云岩、泥灰岩—白云岩、礁灰岩—白云岩四种互层类型最为常见(图 1-g、h、i、j), 形成于潮下潮间环境。互层韵律具有向上变浅、变粗变厚特征, 有的暴露标志特征极为明显。该类型韵律在中上泥盆统及石炭系层序中均发育。

上述三种碳酸盐岩型韵律中, 以灰岩韵律最为发育, 其次为白云岩韵律。所有这种韵律都是由向上变浅的旋回层序构成。两旋回层序间由一个突然变到相对深水相为特征的面分开。该面的形成是由于瞬时的在盆地范围内相对海平面快速上升导致的。这一海平面快速上升之后的滞后的薄而细的较深水沉积物构成了旋回层序的下部单元, 而在基底面相对海平面下降的长时限内形成的相对厚而粗的浅水沉积物构成了层序的上部单元。这上下二单元的垂向叠加便导致了间断加深向上变浅旋回层序的形成。上述六级旋回层序上部单元厚度多为 0.2~1.0 m, 下部单元厚度为毫米级至 0.3 m。

3.1.2 碎屑岩型

该类型分布局限, 在中泥盆统的第 8、9、10 层序的 HST 及石炭系第 2 层序的 HST 和第 3 层序的 TST 中发育, 根据岩石类型统计有 11 种韵律组合型式, 常见的有粉砂岩—细砂岩, 泥岩、炭质泥岩或煤层—细砂岩、砂岩—砂砾岩三种韵律(图 2-a、b、c), 其中煤层或炭质泥岩—细砂岩韵律只发育于下石炭统, 砂岩—砂砾岩互层韵律只发育于中泥盆统。

该类型旋回结构均为向上变浅, 旋回下部相对较薄、上部较厚, 可能反映海退持续时间较长, 并显示了非对称性特点, 形成于碎屑滨岸、潮坪、近岸沼泽及三角洲前缘和三角洲平原分流河道等环境中。

3.1.3 碳酸盐岩与砂泥岩混积型

该种互层韵律在研究区各层序中均有发育, 分布很广, 以泥岩—生物碎屑灰岩或泥晶灰岩、礁灰岩或生物屑灰岩—砂岩, 白云岩—砂岩, 砂质灰岩—砂岩或砂砾岩等互层类型最为常见(图 3-a、b、c、d), 形成于混积滨岸、潮坪环境, 具向上变浅、变粗变厚特征, 与碳酸盐岩型六级旋回层序一样, 属于间断加深变浅旋回层序。

以上三种韵律组合及其中的各个类型基本上代表了中上泥盆统、石炭系的六级层序特征, 这些韵律都以向上变浅沉积为特征。具向上变厚变粗的剖面结构, 碳酸盐岩型以加积为主, 碎屑岩型以进积为主。部分剖面结构具向上变薄变细特点, 这主要发育在潮间至

潮上坪环境中。一般来说,这些互层韵律相当于周期为 2 万年的米级旋回层序,是与米兰柯维奇天文旋回有关的高频率振荡海平面变化旋回的产物。

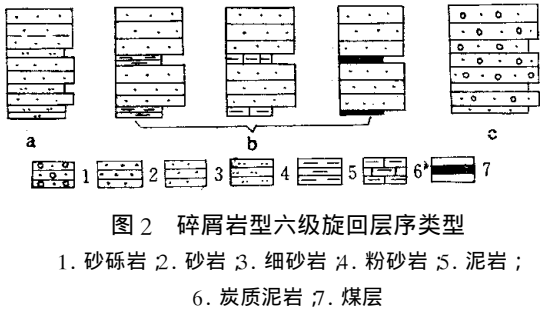


图 2 碎屑岩型六级旋回层序类型

1. 砂砾岩 2. 砂岩 3. 细砂岩 4. 粉砂岩 5. 泥岩;
6. 炭质泥岩 7. 煤层

Fig. 2 Clastic rock types of sixth-order cyclic sequences

1. sandy conglomerate; 2. sandstone; 3. fine sandstone;
4. siltstone; 5. mudstone; 6. carbonaceous mudstone; 7. coal

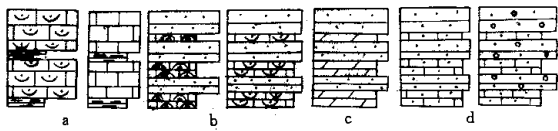


图 3 混积型六级旋回层序类型(图例同图 1、2)

Fig. 3 Hybrid sediment types of sixth-order cyclic sequences (see Fig. 1 and Fig. 2 for explanation symbols)

3.2 五级层序

五级层序主要为厚 1m 以上的准(副)层序,也有人称之为小层序,它可以是由三个以上单元组成的向上变薄或变厚的沉积序列,也可以是由 2 个或多个韵律层归并而成的沉积序列,它的顶底常由更明显的侵蚀或岩相突变界面所限定。研究区五级层序的界面常见的是岩性的突变界面,如砂岩与灰岩、泥岩与灰岩等,这种界面的上下单元往往代表了不同的物源,在特定的海平面升降背景之下,不同物源的上下单元就构成了一个准层序,如灰岩—砂岩准层序,灰岩代表一次海泛,并来自于海源,砂岩来自于陆源,代表了准层序是由短周期海平面上升—下降过程的产物。其次是海侵冲刷界面,这种界面的准层序底面往往发育冲刷面,平面上呈波状起伏。第三类界面为波浪改造面,该界面受到大量生物潜穴和波浪改造形成,为生物或生物碎屑、砂屑等的富集层,沉积物来自于单向的海源方向。第四类界面为暴露面,由于高频率海平面振荡,水体向上变浅小旋回发育,顶界暴露标志发育,如岩溶角砾岩,溶孔白云岩,古风化土等。如泥盆系第 17 层序 HST 中发育的生物屑灰岩—灰质岩溶角砾岩旋回。第五类界面为水下硬底,由于生物扰动及海底成岩间断形成水下硬底,代表了短暂的海泛期,界面之上为自生成因的碳酸盐岩。

综观研究区各层序中五级层序的岩性组成,可以将其形成归纳成两种方式:第一种方式由 2 个或多个六级韵律层归并而成,这也是本区五级层序的主要构成方式,形成的五级层序韵律性明显,前述六级层序中的三种类型均可构成五级层序,其中有的仅是简单的韵律重叠,垂向上变化特征不明显,而有的韵律在相互叠置过程中,却表现出向上变浅、变粗、变厚或变薄的特征,这反映出了水体深度的变化。第二种方式是由三个或三个以上沉积单元组成向上变厚或变薄的沉积序列,这种方式构成的五级层序其韵律性不明显。综合本区中上泥盆统、石炭系各层序中该类五级层序的沉积序列,提出下述四种理想沉积序列(图 4):

(1) 灰岩组合:从下往上由泥灰岩—泥晶灰岩—粒泥灰岩—泥粒灰岩—粒屑灰岩组成,表现为水体向上变浅,单层厚度向上变厚,粒度向上变粗特征,发育在台地及浅滩的正常浅海环境中。在礁环境中(图 4-a)礁灰岩代替上述沉积序列中的泥晶灰岩和粒泥灰岩;

(2) 白云岩组合:由白云质灰岩—灰质白云岩—生物屑白云岩—白云岩—藻纹层白云岩组成沉积序列,代表了水体向上变浅的局限台地和潮坪环境。在台地环境中,表现为向上变厚变粗(图 4-b),而在潮坪环境中却表现为向上变薄变细(图 4-c)。该类型准层序界面为暴露面和海侵冲刷面。

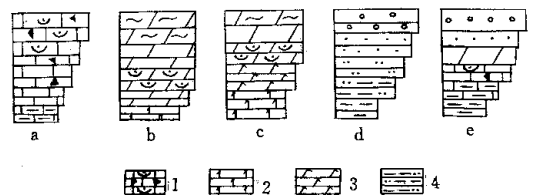


图 4 理想的五级旋回层序类型(其它图例同图 1、2、3)

1. 粒泥灰岩 2. 白云质灰岩 3. 灰质白云岩 4. 粉砂质泥岩。

Fig. 4 Ideal types of fifth-order cyclic sequence

(See Fig. 1 Fig. 2 and Fig. 3 for other explanation symbols)

1. wackestone; 2. dolomitic limestone; 3. lime dolostone;
4. silty mudstone.

(3) 碎屑岩组合,由泥岩或炭质泥岩—粉砂质泥岩—粉砂岩—砂岩—砾岩组成典型的向上变粗的进积型沉积序列(图 4-d),形成于潮坪、三角洲前缘及三角洲平原分流河道环境中。

(4) 碎屑岩与碳酸盐岩混合沉积序列,由泥岩—泥灰岩—泥粒灰岩—白云岩—砂岩—砾岩组成进积型沉积序列(图 4-e),代表了由海侵到海退的沉积旋回系列,为一典型的进积型准层序。

上述四种沉积序列，都是高度概括的理想序列，在研究区中上泥盆统及石炭系地层剖面中这种完整的沉积序列并不多见。在实际序列中，由于三级、四级海平面振荡及相邻五级海平面变化的改造作用，理想沉积序列中的沉积单元常见有明显的兼并现象，故经常以不完整的沉积序列组成一个五级层序，如泥晶灰岩—含生物屑灰岩—生物屑灰岩组成一个五级层序；生物屑灰岩—砂质灰岩—细砂岩—含砾砂岩组成一个五级层序等。

3.3 四级层序

四级旋回层序主要为厚度在 4~25 m 的准层序组，主要由 4 个或小于 4 个的五级层序归并而成^[6]。准层序组没有固定的岩相组合，但准层序的排列具有一定的叠置方式，即有加积、进积、退积等三种方式，不同叠置方式的形成取决于沉积速度与可容空间形成速

度间的比值。由这三种叠置方式就相应形成了三类准层序组，退积型准层序组形成于可容空间形成速度大于沉积速度的条件下，在垂向上叠置的准层序就显示其沉积水体向上变深，而进积型准层序组恰恰与其相反。加积型准层序组形成于沉积速度等于可容空间形成速度的条件下，垂向上叠置的准层序显示其沉积水深不变化或变化很小。

这三类准层序组的垂向叠置就组成了四级巨旋回，相当于体系域。退积巨旋回形成海侵体系域，进积巨旋回形成低水位体系域，加积或加积—进积巨旋回形成高水位体系域。进积巨旋回与退积巨旋回转换处为初始海侵期沉积，而退积巨旋回与加积巨旋回的转换处为最大海侵期的低速沉积。这三种四级巨旋回的垂向叠置就组成了三级旋回。

根据上述六级层序、五级层序、四级层序的组成特

表 2 中上泥盆统及石炭系高频层序数目

Table 2 The number of high-frequency sequences in the middle and upper Devonian and Carboniferous

	中上泥盆统					石炭系	中上泥盆统				
	三级层序	四级巨旋回	四级层序	五级层序	六级层序		三级层序	四级巨旋回	四级层序	五级层序	六级层序
中 上 泥 盆 统	S ₁₇	HST	4	16	46		S ₁₀	HST	2	10	14
		TST	1	3	8			TST	1	2	2
		LST	暴露、溶蚀残积					LST	暴露、溶蚀		
	S ₁₆	HST	3	10	48		S ₉	HST	3	10	13
		TST	2	5	12			TST	1	2	2
	S ₁₅	HST	4	9	27		S ₈	LST	暴露、溶蚀		
		TST	2	7	13			HST	5	16	35
	S ₁₄	HST	5	15	26		S ₇	TST	2	4	6
		TST	2	5	12			HST	2	5	12
	S ₁₃	HST	5	20	44		S ₆	TST	2	4	10
		TST	1	2	4			HST	4	10	15
		LST	暴露					TST	2	4	6
	S ₁₂	HST	5	20	48		S ₅	LST	暴露		
		TST	3	10	34			HST	3	11	14
		LST	暴露					TST	1	3	6
	S ₁₁	HST	2	4	13		S ₄	HST	5	19	35
		TST	3	10	19			TST	7	28	90
		LST	暴露、溶蚀残积					HST	5	15	62
S ₁₀	HST	6	19	33	S ₃	TST	4	15	60		
	TST	3	11	25		LST	暴露				
S ₉	HST	6	18	45	S ₂	HST	4	14	67		
	TST	2	4	10		TST	4	9	23		
S ₈	HST	4	13	28	S ₁	HST	4	14	52		
	TST	4	16	47		TST	6	22	50		
	LST	暴露				LST	暴露				

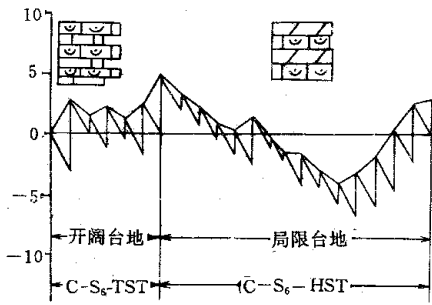


图 5 贵州独山地区石炭系第 6 层序 Fischer 图解
Fig. 5 Fischer plot of sequence 6 of Carboniferous in Dushan region, Guizhou province

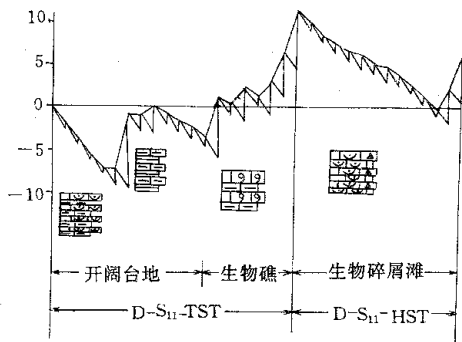


图 6 贵州独山地区泥盆系第 11 层序 Fischer 图解
Fig. 6 Fischer plot of sequence 11 of Devonian in Dushan region, Guizhou province

征及划分理论,将中上泥盆统的 10 个三级层序和石炭系的 10 个三级层序进行了详细的高频层序分析,具体数字见表 2。

4 高频层序发育的控制因素

高频层序的发育受到海平面变化、构造沉降、沉积环境、物质来源和气候等多因素的控制。这些控制因素变化的总和反映在沉积物容纳空间的变化上,而沉积物容纳空间的变化是与高频层序的厚度变化密切相关的。在特定时间范围内有效容纳空间的变化可以根据 Fischer 图解曲线来反映,这是因为 Fischer 图解是经过线性沉降校正之后利用高频旋回层序(六级)的累积厚度与时间的变化作用而得出的一种图解方法。所以说高频旋回层序的发育情况及其累积厚度和不同的叠置类型便直接决定了 Fischer 图解曲线形态,不同形态的 Fischer 图解曲线则反映了不同的海平面变化规律、变化程度以及不同的沉积环境和沉积物供给情况等。

图 5 所示的 Fischer 曲线形态反映了在台地环境中由于海平面及岩石组合发生变化所形成的高频层序及其发育情况。TST 由 6 个中厚层状的砂屑生物碎屑灰岩与中薄层泥微晶灰岩互层组成。垂向叠置上互层韵律厚度变化不大或略微增加,反映其沉积时容纳空间增加速率变化不大,说明随着海平面上升碳酸盐生产速率增加,沉积速率与海平面上升速率大致保持一致, Fischer 图上表现为海平面的低频低幅缓慢上升。HST 初期由中厚层粒屑灰岩或者生物碎屑灰岩与薄层泥微晶灰岩互层,互层韵律厚度减小,互层厚度总体向上变薄,反映沉积物容纳空间减小。这是由于海平面的下降速率超过碳酸盐供给速率所致, Fischer 曲线图上表现为向下的陡倾斜,反映了海平面的中幅中频的快速下降。HST 晚期由生物碎屑灰岩与白云岩互层韵律组成,且互层厚度增加,垂向叠置上互层韵律厚度呈正向增加,可能表明在局限台地环境中,海平面下降到适合碳酸盐生产的水深,或者沉积物供给发生变化造成沉积物供给速率增加,致使沉积厚度增大。Fischer 曲线呈现上升形态,反映了海平面由快速下降变为低频低幅的缓慢下降。

图 6 所示的 Fischer 曲线形态反映了海平面、沉积环境及沉积物供给变化所形成的高频层序及其发育情况。在 TST 初期由于海平面的快速上升导致水体加深,沉积环境由局限台地演变到开阔台地。由于沉积水体的急剧加深使得碳酸盐生产速率受到抑制而迅速降低,形成了由生物屑灰岩与泥灰岩互层韵律组成的、互层厚度向上减薄的高频层序叠置类型, Fischer 曲线形态呈现出急剧向下的陡倾斜。随后由于沉积物供给发生变化,泥质沉积物混入,沉积物供给速率急剧增大,形成了由泥灰岩与泥页岩互层韵律组成的、互层厚度向上增大的高频层序叠置类型, Fischer 曲线呈急剧上升。随着海平面的上升,海水深度的加大,泥质沉积物供给减少,沉积速率减慢,形成的互层韵律厚度减小, Fischer 曲线形态又呈现向下倾斜。随着开阔台地向生物礁环境的演变,海平面从快速上升过渡到缓慢上升,碳酸盐生产速率又急剧增加造成沉积物沉积速率增大,形成由礁灰岩与泥灰岩互层韵律组成的、互层厚度向上增加的高频层序叠置类型, Fischer 曲线形态呈上升陡倾斜线。HST 时期,沉积环境由生物礁过渡到生物碎屑滩,尽管沉积物供给速率增加,但由于海平面的快速下降,造成沉积物有效容纳空间的减小,形成含砾的生物碎屑灰岩与生物屑灰岩互层韵律组成的、互层厚度向上减薄的高频层序叠置类型, Fischer 曲线形态呈现急剧的向下陡倾斜。

图 7 所示在不同沉积环境中由于海平面变化,不

同物源沉积物供给及同一沉积环境中不同的岩石组合对高频层序发育的影响。海侵期在台棚沉积环境背景下由于海平面的上升造成水体加深,碳酸盐的生产速率和供给速率减小,虽然容纳空间增大,但是形成的生物碎屑灰岩与泥晶灰岩或泥灰岩互层韵律厚度却向上急剧减小,在 Fisher 曲线上表现为陡倾斜的下降形态。从图上可以看出,海平面上升期由两个次级海平面变化旋回叠加而成,次级海平面变化为快速上升缓慢海退,叠加而成的三级海平面上升具有高频低幅快速上升特点。台棚环境中由铁质白云质灰岩与白云岩互层韵律组成的高频旋回层序,其互层厚度向上增加,是在次级海平面的海退阶段形成的,在 Fisher 曲线图上表现为上升形态。这反映了同一沉积环境中不同岩石组合对高频旋回层序发育的影响,在碳酸盐沉积背景条件下,不同的岩石组合指示了不同的气候条件,这也表明了气候条件的改变对高频旋回层序发育的影响。高水位初期由于大量陆源碎屑物质的加入,环境演变为三角洲前缘,沉积物供给速率的大幅度增加,在海平面变化呈现缓慢海退,容纳空间未发生明显减小的情况下,形成由砂岩与粉砂质泥岩互层韵律组成的、互层厚度向上增加的高频层序叠置类型,曲线上表现为陡倾斜上升形态。随后由于海平面的下降速率加大,造成沉积物容纳空间的减小,形成由砂岩与粉砂岩互层韵律组成的、互层厚度向上减薄的高频层序叠置类型,曲线为陡倾斜下降形态。

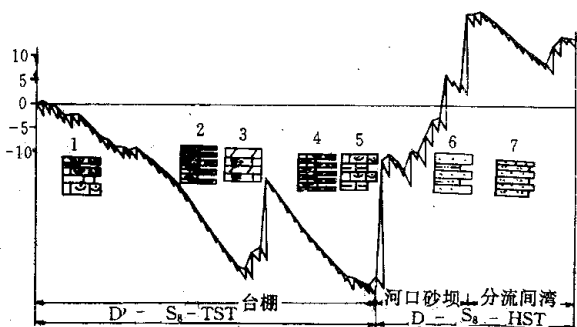


图 7 贵州独山地区泥盆系第 8 层序 Fisher 图解

Fig. 7 Fisher plot of sequence 8 of

Devonian in Dushan region, Guizhou province

从上述 Fisher 曲线形态与高频旋回层序发育控制因素关系讨论中可以看出,在同一沉积环境中,海平面变化、构造沉降、不同岩石组合、物质来源、气候条件等都可以单因素控制高频旋回的发育,也可以由两个或两个以上的控制因素共同作用控制高频旋回的发育,如海平面变化与物质来源、海平面变化与构造沉降、海平面变化与气候等。沉积环境对高频旋回层序发育的

影响是相当明显的,不同沉积环境中,高频旋回层序类型、规模、叠置关系明显不同。而不同沉积环境却是由大地构造条件、不同级别海平面变化、物质来源及气候条件等共同决定的。所以说影响高频旋回层序发育的因素是多方面的,并且这些控制因素又相互影响,相互作用,因此在分析高频层序发育的控制因素时,要分清主要的影响因素和次要的影响因素。

5 高频层序与复合海平面变化

复合海平面变化由 Goldhammer R K. 等^[7]在研究 Alpine 地区三叠纪碳酸盐地层层序中提出来的。复合海平面变化是指叠加在不同频率以及不同幅度的相对海平面之上的海平面变化。无论是何种成因的海平面变化都以显示出不同级次的叠加状态从而形成了一个复杂的沉积—复合海平面控制下的复合旋回层序。六级、五级、四级旋回层序是在低频长周期海平面变化控

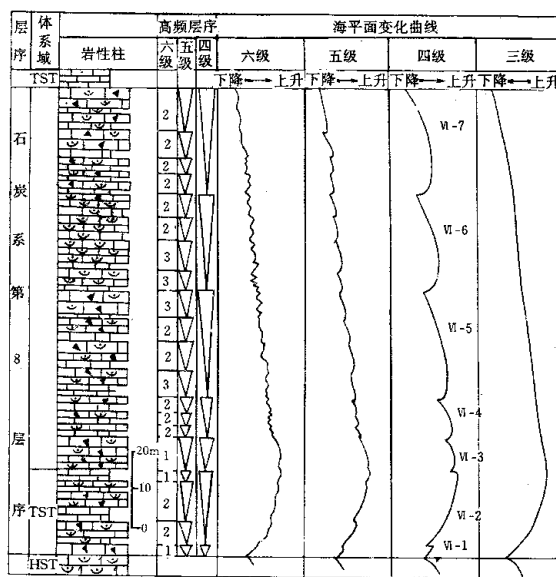


图 8 贵州独山地区石炭系第 8 层序内高频层序的垂直叠加状态及复合海平面变化特征(图例同图 1、2)

Fig. 8 The vertical stacking patterns of high-frequency sequences and composite sea-level changes in Sequence 8 of Carboniferous in Dushan region, Guizhou province (see Fig. 1 and Fig. 2 for explanation of symbols)

制下高频短周期海平面变化的产物。其中六级旋回层序是复合旋回层序的基本单元^[8]。

复合海平面变化是导致地层有序叠加型式形成的驱动力。这一型式由典型的高频第四级、第五级、第六级旋回层序组成并受低频的第三级相对海平面变化的影响和控制。不管形成这种高频率旋回的机制是自旋回机制还是异旋回机制,这些旋回系列的有序叠加形

式都将存在。层序叠加型式在垂向上的规则变化是由于第三级海平面相对升降阶段可容空间的规律性变化造成的,而且这些变化不受高频旋回机制的影响。具体来说,由三级、四级、五级、六级海平面变化相互叠加形成的复合海平面变化沉积层序,在三级海平面上升时期,叠加的高频率海平面振荡变化形成的旋回层序被迫失去陆上暴露节拍,因为纯粹的海水深度的增加,其结果就形成以潮下单元为主的以淹没节拍为主的旋回序列;在三级海平面相对变化的停滞期及下降期则形成以暴露为特征的非沉积作用沉积小间断为界面的高频率振荡旋回序列^[9]。

以石炭系第8层序为例来说明高频层序与复合海平面的变化。图8清楚地显示该层序内每个四级旋回层序与五级、六级旋回层序一致,也反映出水体向上变浅的演化趋势和过程。但这一趋势和过程是受三级海平面变化规律控制的,即在构成三级层序海侵体系域内的四级旋回层序IV-1、IV-2中,IV-1四级层序由1个由砂屑灰岩纵向上变化组成的六级层序构成,砂屑含量及粒度从下往上减少,变小,泥晶基质含量相应增加,代表水体能量减弱,水体深度逐渐加深。IV-2由五个六级层序叠加而成,根据组成六级层序的岩石类型及特征可知,其上部六级层序指示的水体深度较下部六级层序指示的水体深度要深,垂向上表现出水体继续加深至水体深度最大,顶端沉积物薄层状泥晶灰岩与三级旋回层序的最大海泛期时的沉积产物相吻合。而在构成三级层序高水位体系域内的四级层序IV-3、IV-4、IV-5、IV-6、IV-7中,IV-3由1个由粒屑灰岩纵向上变化组成的六级层序构成,从下至上,粒屑含量增加,出现白云石矿物,亮晶胶结物含量增加,单层厚度增大,明显反映出水体能量由低到高,水体由深变浅的变化趋势。IV-4四级层序由6个泥晶灰岩—粒屑灰岩六级层序组成,垂向上叠加呈现出粒屑灰岩层厚度增大,而泥晶灰岩层厚度变小,粒屑含量增加,顶部出现白云石矿物及渗滤粉砂,铁泥质填隙物等浅水及暴露的标志性产物和构造特征,这同样也明显反映出水体由深变浅的沉积过程。同样由岩性、岩石特征及其它沉积结构、构造特征表明四级层序IV-5、IV-6、IV-7均反映出在垂向上从下至上水体由深变浅、能量由低到高,单层厚度增大的变化趋势。五个四级旋回层序

在垂向上叠加反映水体变浅速度由快到慢,单层厚度增大速度变快,呈现出典型的加积型沉积序列特征。上述四级旋回层序特征充分说明高频海平面(六级、五级、四级)升降周期的变化和沉积物可容空间的变化是受低频(三级)的长周期的可容空间的控制,而长周期可容空间变化则不受短周期海平面变化的控制,却由它们的作用产物表现出来^[8]。

长周期的三级层序和短周期的各级高频层序的形成以及它们的复合有序的叠加状态除受构造沉降、沉积物供给速率影响外,最主要的是受不同级次复合海平面升降变化的控制,导致了不同级次地层形成和垂向上的有序叠加。但不同古地理背景的地方性旋回层序特点却有不同:一般在相对水体较深或较浅的地区,高频振荡旋回会失去节拍(不发育),局部构造活动的影响甚至会造成四级旋回层序的缺失。因此工作中即要掌握复合海平面变化的总趋势,在划分高频层序级次时还要结合地区特色,剔除古地理因素,恢复古海平面变化特征^[8]。

参 考 文 献

- 1 陈宏明,吴祥和,张瑛,李耀西,文琼英等著.中国南方石炭纪岩相古地理与成矿作用[M].北京:地质出版社,1994,17~29
- 2 郑荣才,李德敏,张梢楠.川东黄龙组天然气储层的层序地层学研究[J].沉积学报,1995,13(增刊):1~9
- 3 李祥辉,刘文均,郑荣才.扬子西缘龙门山区泥盆纪沉积旋回与相序样式[J].矿物岩石,1998,18(2):115~120
- 4 Mitchum R M, Van Wagoner J C. High frequency sequences and their stacking patterns; sequence-stratigraphic evidence of high frequency eustatic cycles[J]. Sedimentary Geology, 1991, 70(2):131~160
- 5 梅冥相.碳酸盐岩米级旋回层序的成因类型及形成机制[J].岩相古地理,1993,13(6):34~43
- 6 王立峰.冀中中奥陶统高频率旋回层序的基本特征[J].岩相古地理,1994,14(6):49~58
- 7 Goldhammer R K, Dunn P A, Hardie L A. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: Examples from Alpine Triassic platform carbonates[J]. Geological Society of American Bulletin, 1990, 102(5):535~562
- 8 陈荣坤.华北地台中寒武世米级旋回层序与复合海平面变化[J].岩相古地理,1996,16(4):23~31
- 9 梅冥相,周丕康.复合海平面变化控制下的碳酸盐向上变浅层序—以贵阳地区三叠系大冶组灰岩为例[J].岩相古地理,1994,14(1):17~23

The Middle Devonian to the Carboniferous High-frequency Sequences and Composite Sea-Level Changes on the Southern Margin of the Upper Yangtze Craton Basin

CHENG Hong-de¹ PENG Jun² TIAN Jing-chun²
HONG Zhong-jian² QIN Jian-xiong² WANG Yue³

1 (Chengdu University of Technology State Key Laborantoy of Oil and Gas

Reservoir Geology and Explaitation ,Chengdu 610059)

2 (Territorial Resources Management Bureau of Dushan County ,Dushan Guizhou 558200)

Abstract

Sedimentary suite , which deposited from littoral to neritic environments and were mainly composed of carbonate rocks , developed on the southern margin of the upper Yangtze craton basin during the middle Devonian Epoch to the Carboniferous Period. This set of suite , which was the products of transgression and regression processes of plaeo marine water with the condition of stable tectonics , recorded the changing processes of plaeo sea-level precisely. The study of sea-level change is helpful to the division of sequence、the research of sequence stacking patterns and the foundation of sequence time-space pattern through the analysis of high-frequency sequences.

The middle Devonian series to Carboniferous system strata high-frequency sequences in the study area may be distinguished from three orders corresponding to the terminology of sequence stratigraphy. Sixth-order sequence is corresponding to the cyclothems , the fifth-order sequence to the parasequence and the fourth-order sequence to the parasequence set. Composite sea-level changes with the different frequencies and cycles which are caused by the Milankovitch cycles control the formation of high-frequency sequences of the different orders. Sixth-order sequence is equal to the meter-scale cyclic sequence. Its genetic mechanism is punctuated-aggradational allocyclic mechanism which is related to high-frequency cyclic sea-level changes resulted from the Milankovitch cycle. The criteria for recognition of sixth-order sequence include the rock types ,boundary surface nature and sedimentary environments. In the study area there are 1116 sixth-order sequences ,belonging to three types including carbonate rock type ,clastic rock type and hybrid sediment type. All these sixth-order sequences are represented by progradational sequence consisting of an upward thickening , shallowing and coarsening rocks , and bounded by punctuated-deeping boundary or eroding surfaces. The upward stacks of two or more sixth-order sequences form fifth-order sequence , whose bottom or top boundary surfaces are more clear eroding surfaces or abrupt lithofacies change surfaces , and whose number is 434 in the study area. The upward stacks of four or less fifth-order sequences inform fourth-order sequence , whose number is 134 in the study area.

The development of high-frequency sequences are controlled by the changes of sea-level ,provenance ,environment ,weather ,tectonic subsidence. Sixth-order ,fifth-order and fourth-order sequences are the products of high-frequency and short cycle sea-level changes control ed by low-frequency and long cycle sea-level changes. So ,through the analysis of the high-frequency sequences with the different characteristics and cycle stacking patterns , the low-frequency and long cycle sea-level changes may be explained. In the craton basin margin environment , during the rising stages of low-frequency sea-level changes , the high frequency sequences are characterized by the "drowning band" , while by the "exposing band" in the standstill and fall stages.

Key words high-frequency sequence composite sea-level change the Middle Devonian to the Carboniferous southern margin of upper Yangtze craton basin