

淹没不整合型碳酸盐三级旋回层序 ——兼论碳酸盐台地的“凝缩作用”

梅冥相

(中国地质大学,北京)

[内容提要] 与层序地层学定义的类型 I 层序(LST+TST+CS+HST)及类型 II 层序(SMT+TST+CS+HST)不同,淹没不整合型碳酸盐三级旋回层序以凝缩段直接覆盖在层序界面之上形成的,“CS+HST”序列为特征,而且其底界面为一淹没不整合面或加深饥饿间断面。该类型三级旋回层序是碳酸盐台地淹没事件产生的凝缩作用过程的产物,它以总体向上变浅的非对称相序为特征。

华北北部晚寒武世地层中发育的四个淹没不整合型三级旋回层序的相序特征表明,台地淹没事件及其相关的凝缩作用,只要沉积背景适合,并非三级旋回层序所独有,高频率海平面变化也常产生“瞬时淹没”,因而凝缩段并非都发育在最大海侵期,并且凝缩段也存在级别归属问题。

关键词: 淹没不整合 旋回层序 凝缩作用

三级旋回层序,类似于 Vail 等(1977,1988)所定义的“层序”(梅冥相,1992,1994)⁽¹⁻⁴⁾。那些以暴露间断面为特征的三级旋回层序,根据暴露间断面所经历的时间长短及空间幅度,分为类型 I 层序(以 LST+TST+HST 序列为特征)及类型 II 层序(以 SMT+TST+HST 序列为特征)。在碳酸盐台地中,还发育有另外一种类型的三级旋回层序,它以“CS(凝缩段)+HST(高水位体系域)”沉积序列为特征,这是由于碳酸盐沉积作用与长周期三级海平面变化特殊的响应形式的结果(Goldhammer 等,1990⁽⁵⁾;梅冥相,1994⁽²⁻⁴⁾)。由于这种三级旋回层序底界面是一个淹没不整合面,因而又把它称为“淹没不整合型碳酸盐三级旋回层序”。这种以凝缩段直接覆盖在层序界面之上为特征的层序,在台地碳酸盐地层中特别发育,对其研究有助于碳酸盐层序地层学的发展,因此本文将对其相序组构形式、沉积作用机制、构造背景等进行系统的介绍。

1 淹没不整合型三级旋回的相序组构

旋回层序,首先是一个有成因相关的相序,它与传统的相序不同的是该相序能反映一个海平面相对升降变化过程;旋回层序界面,首先是一个相变面,而且是一个“突然相变面”,它与一般的相变面不同的是该界面是下伏地层向上变浅、上覆地层向上加深的复杂动态过程

的产物。因此,“岩性、岩相、相序”是层序地层学及旋回地层学研究的关键,在相序基础上识别出的不同级别的旋回层序及其相序之间的有序叠置形式是研究的核心内容。旋回层序的两大特征:空间上相序的有序性及时间上环境变化的同步性,使它成为地层学及沉积学研究的热点(Schwarzacher, 1993⁽⁶⁾; Goldhammer 等, 1990⁽⁵⁾, 1993; Comez 等, 1994⁽⁷⁾; 梅冥相, 1992, 1994⁽¹⁻⁴⁾)。

淹没不整合型碳酸盐三级旋回层序,以总体向上变浅的非对称相序为特征,具体说来距以“盆地相泥页岩→浅水碳酸盐沉积”的相序型式为特征(图1)。

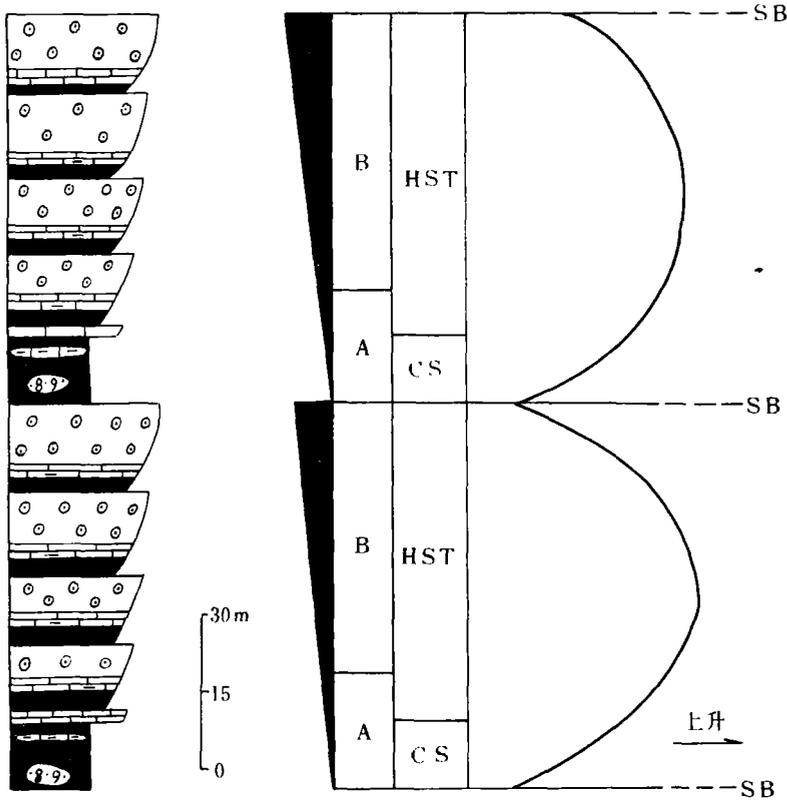


图1 碳酸盐淹没不整合型三级旋回层序的相序特征

- A. 为盆地相钙质泥页岩夹薄层泥质泥晶灰岩(在A中见海绿石生物屑灰岩透镜体之类的沉积);
- B. 为浅水台地碳酸盐沉积;CS为凝缩段;HST为高水位体系域;SB为旋回层序界面

Fig. 1 Facies sequence of third-order carbonate cyclic sequences of drowned unconformity type
 A represents calcareous mudstone and shale interbedded with thin-bedded muddy micritic limestone in the basin facies(The glauconitic bioclastic limestone lens are seen in A);B indicates shallow-water carbonate platform sediments;CS=condensed section; HST=highstand systems tract;SB=sequence boundary

如图1所示的垂向相序特征,如果加以横向追索,即可得出如图2所示的沉积模式。即在相对海平面上升期间,由于海平面上升速率超过碳酸盐的生产和堆积速率,产生淹没事件而形成下部沉积单元——凝缩段,该凝缩段直接覆盖在下伏层序的HST单元上,二者之间即为一个淹没不整合面;在三级海平面变化速度变慢而进入停滞期及下降期,碳酸盐生产速

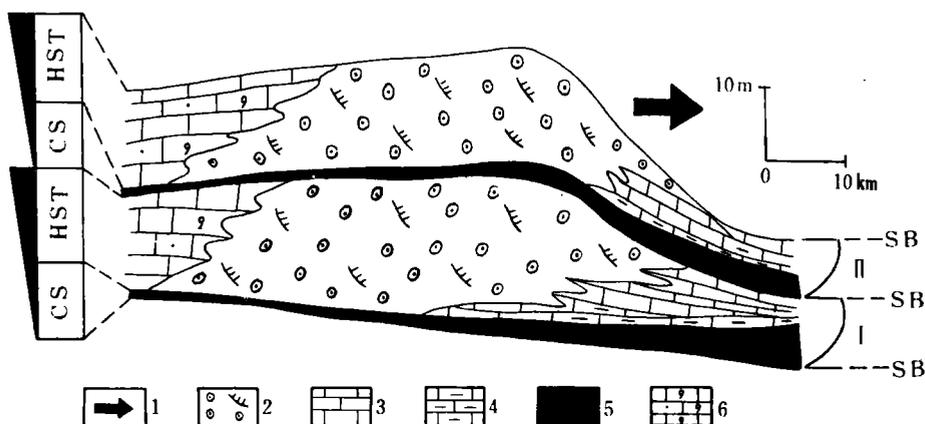


图2 碳酸盐淹没不整合型层序的沉积模式

1. 进积作用方向; 2. 浅滩相颗粒灰岩; 3. 半远洋相薄层泥晶灰岩; 4. 盆地相薄层泥灰岩、泥质泥晶灰岩; 5. 盆地相钙质泥岩; 6. 滩后开阔台地相弱白云石化颗粒泥晶灰岩;
SB 为层序界面; I 和 II 代表三级旋回层序; CS 为凝缩段; HST 为高水位体系域

Fig. 2 Sedimentary model of the carbonate sequences of drowned unconformity type

- 1=progradation direction; 2=grainstone in the shoal facies; 3=hemipelagic thin-bedded micritic limestone; 4=thin-bedded marl and muddy micritic limestone in the basin facies; 5=calcareous mudstone in the basin facies; 6=weakly dolomitized grainy micritic limestone in the backbeach open platform facies; SB=sequence boundary; I and II=third-order cyclic sequence;
CS=condensed section; HST=highstand systems tract

率和堆积速率逐渐增大,从而沉积由浅水碳酸盐沉积构成的高水位体系域(HST)。在前一阶段,常常发育非沉积作用面,如水下硬地等,发育自生矿物,如富磷结核、含海绿石生物屑灰岩透镜体,地层序列多以退积序列为特征;在后一阶段,以加积作用和向盆地方向的进积作用为特征,碳酸盐快速堆积常常变浅至海平面,故常见暴露间断面和准同生局部白云石化作用的产物。两个阶段的产物叠加在一起即形成一个能反映长周期三级海平面变化过程的非对称相序。随着古地理背景由深变浅,这种类型的三级旋回层序的CS单元逐渐变薄,有时从盆地相钙质泥岩变为半远洋相薄层泥质泥晶灰岩;HST单元具增厚趋势,到台地内部白云石化程度增强。

该类型三级旋回层序不同于 Exxon 模式定义的类型 I 及类型 II 层序,关键在于其底界面是一个淹没不整合面或称为“加深饥饿间断面”。我国南方三叠系之底部的大冶组灰岩包含的两个三级旋回层序就属于淹没不整合型层序(梅冥相、周丕康,1994)^[2],华北寒武系张夏组构成的三级旋回层序亦属于该类型(梅冥相,1994)^[3]。华北地台北部晚寒武世地层中发育的三级旋回层序也是淹没不整合型,现以其为例介绍该类型三级旋回层序的特征。

2 华北北部晚寒武世地层中发育的淹没不整合型三级旋回层序

在华北北部寒武世地层中,主要发育以下成因岩石及岩相单元:

a. 盆地相钙质泥岩。发育水平纹层及水下硬地,偶夹海绿石生物屑灰岩透镜体及具铁质浸染圈的异地型风暴砾屑灰岩,为风暴浪基面乃至透光带之下的深水宁静水体环境的产物。

b. 盆地相及深缓坡相发育风暴韵律层的薄层泥晶灰岩。发育毫米级风暴韵律层,该韵律层由来自浅水台地的砂屑及粉屑构成的厚 1mm~3mm 的正粒序层构成,亦发育水平纹层,为风暴浪基面附近宁静深水环境的产物。

c. 深缓坡相薄层泥质泥晶灰岩及薄层泥晶灰岩。发育水平纹层,夹泥质条带,见原地型风暴砾屑灰岩层及透镜体,为风暴浪基面附近的宁静深水环境的产物。

d. 中缓坡相生物潜穴中厚层颗粒泥晶灰岩。发育平行及斜交层面的生物潜穴,夹原地型风暴砾屑灰岩,发育冲刷面,为潮下中至高能环境的产物。

e. 浅缓坡相厚层鲕粒灰岩。发育交错层理,见冲刷面,冲刷面之上由细砾屑、砂屑及鲕粒充填,为潮下高能带之产物。

f. 浅缓坡相厚层至块状生物丘灰岩。发育柱状叠层石,常与鲕粒灰岩共生,为潮下高能带之沉积。

g. 风暴砾屑灰岩(习称的“竹叶状灰岩”)。常以透镜体或透镜层状产出,有两种类型:一种是由风暴作用对泥晶灰岩进行原地改造形成的“竹叶状灰岩”;另一种是经风暴作用形成碎屑流搬运至深水环境中形成的异地型风暴岩,后者常与钙质泥页岩共生,发育铁质浸染圈,以前认为是氧化圈,笔者认为是在深水还原环境中铁质浸染所致。

把上述成因岩相单元从下到上由深变浅叠加在一起,即构成一个环境向上变浅、岩层向上变厚、颗粒向上变粗的沉积序列(图 3),该序列代表一个完整的潮下型碳酸盐米级旋回层序。在实际地层记录中,这种完整的相序较罕见,多为两个岩相单元构成的潮下碳酸盐米级旋回层序,从浅至深米级旋回层序类型形成有规律的变化,从而构成一个米级旋回层序的环境变化谱系(图 4)。而且这些米级旋回层序常常由3-5个构成一个更大级别的旋回层序(图5)。

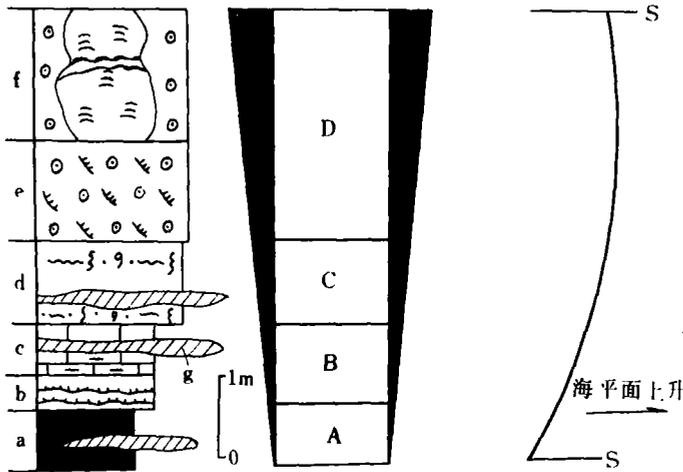


图 3 完整的连续的潮下碳酸盐型米级旋回层序

图中之 a、b、c、d、e、f、g 分别代表不同的岩相单元,详见正文;A、为盆地相;B、为深缓坡相;

C、为中缓坡相;D、为浅缓坡相;S、为米级旋回层序的界面

Fig. 3 Uninterrupted meter-scale cyclic sequence of subtidal carbonates

(See the text for the explanation of the lithofacies represented by a, b, c, d, e, f and g)

A=basin facies; B=deep ramp facies; C=moderate ramp facies; D=shallow ramp facies;

S=meter-scale cyclic sequence boundary

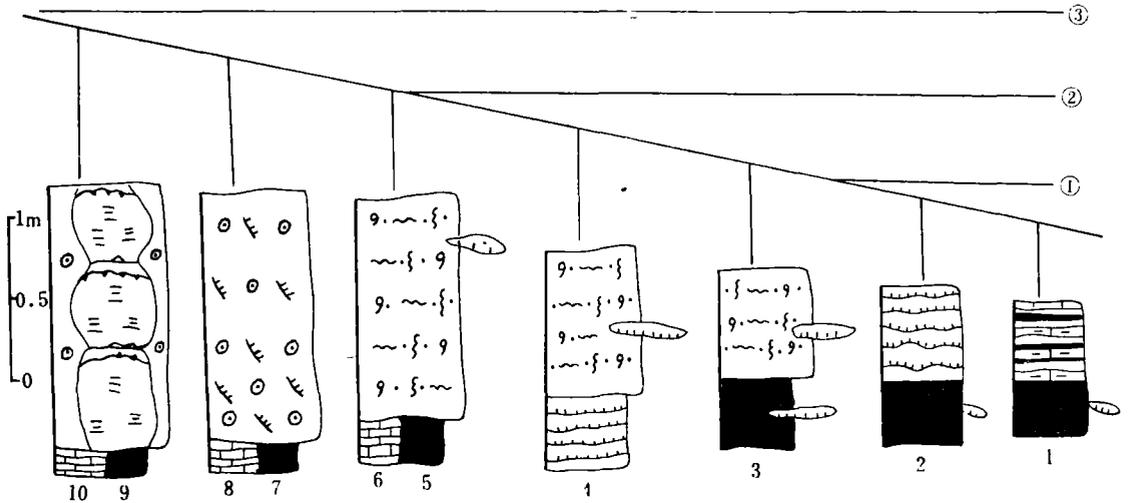


图4 米级旋回层序的环境变化谱系

①为风暴浪基面；②为正常浪基面；③为海平面；1和2为深缓坡型米级旋回层序，类似于L-M型；3和4为中缓坡型米级旋回层序；5至10为浅缓坡型米级旋回层序(岩性符号同图3)

Fig. 4 Hierarchy of the environmental changes of the meter-scale cyclic sequences

①=storm wave base;②=normal wave base;③=sea level;1 and 2 represent meter-scale cyclic sequences of deep ramp type,analogous to the L-M type; 3 and 4 represent the meter-scale cyclic sequences of moderate ramp type; 5 to 10 represent the meter-scale cyclic sequences of shallow ramp type (Lithologic symbols as in Fig. 3)

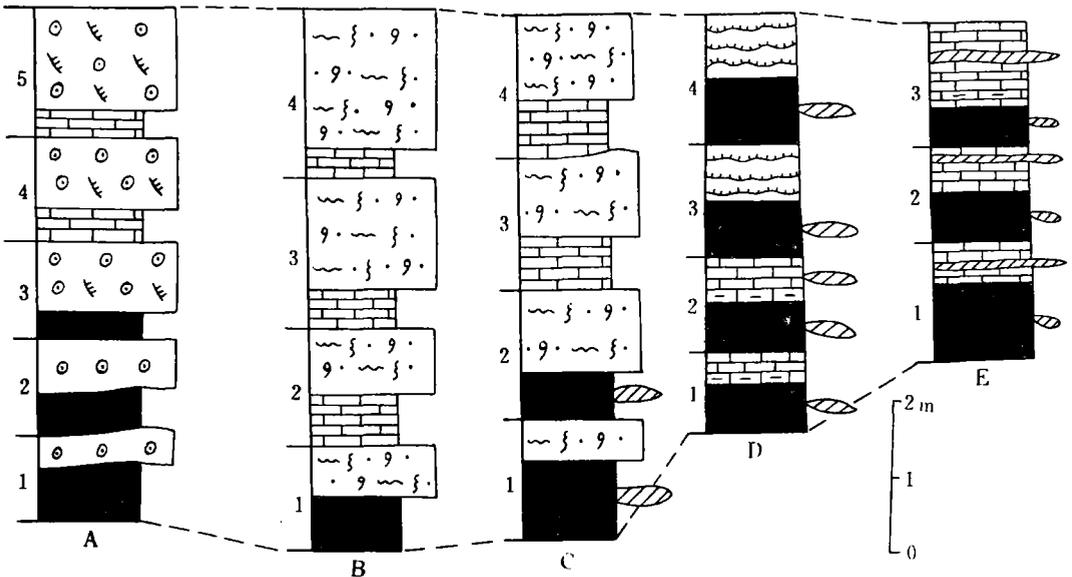


图5 米级旋回层序的有序叠加型式

A和B发育在浅缓坡环境；C发育在中缓坡环境；D和E发育在深缓坡及深水盆地中(注意其纵向及横向上的变化，岩性符号同图3)

Fig. 5 Ordered stacking patterns of the meter-scale cyclic sequences

A and B are developed in the shallow ramp environment;C is confined to the moderate ramp environment,and D and E occur in the deep ramp and deep-water basin environments

(Note the longitudinal and horizontal changes. The lithologic symbols as in Fig. 3)

单个米级旋回层序为六级旋回层序(周期为 0.1Ma,与短偏心率旋回有关),由 4 个左右米级旋回层序构成的序列属五级旋回层序(周期为 0.4Ma,与长偏心率旋回有关)这种 1:4 的叠置关系表明它们的形成机制与米兰柯维奇旋回机制有关。

在三级海平面变化的相对上升期间,主要沉积盆地相钙质泥岩夹少量泥质泥晶灰岩,局部发育深缓坡型碳酸盐米级旋回层序(图 4 之 1 和 2),构成总体为盆地相的沉积组成的凝缩段,该沉积单元中发育海绿石生物屑灰岩透镜体;在三级海平面变化的停滞期及相对下降期,随着环境的逐渐变浅,碳酸盐生产和堆积速率增大,故发育中缓坡至浅缓坡型米级旋回层序(图 4 之 4 至 10),形成了由中缓坡至浅缓坡相地层组成的高水位体系域(HST)。根据这种相序的反复发育,在华北北部的晚寒武世地层中识别出四个淹没不整合型三级旋回层序(图 6)。该四个三级旋回层序的底界如图 7 所示,尽管在不同的剖面点三级旋回层序的相序特征不完全一致,如河北兴隆剖面第Ⅳ个三级旋回层序的 HST 单元主要为潮坪相白云岩,在河北保定清醒剖面中第Ⅳ个层序的 CS 单元主要为一层厚数米的海绿石生屑及生物壳灰岩,在浑源悬空寺剖面第Ⅰ个层序的 HST 单元为一套生物丘灰岩等等,但它们从古水深变化反映出的相对海平面变化过程是同步的,这也就反映了三级旋回层序的区域上大范围的可对比性及可追索的特点。笔者在与梅仕龙博士一起研究河北保定清醒剖面时,发现根据生物化石带确定的崮山阶、长山阶、凤山阶的变化界线比三级旋回层序的界面高 1m~2m,这是否表明生物变化滞后于环境变化还有待今后进一步研究。

3 碳酸盐台地中的“凝缩作用”——淹没不整合型三级旋回层序的形成机制初探

凝缩段是如此的重要,是因为层序地层学认为凝缩段是一个等时性沉积单元,代表最大海泛期的产物,是等时性年代地层对比的标志。但是,凝缩段并非都发育在最大海泛期,淹没不整合型三级旋回层序的相序特征即表明了这一点。

凝缩段的形成作用即为凝缩作用,它是由地层的沉积作用速率和堆积作用速率的降低,乃至非沉积作用的结果,在沉积速率较低的背景中常见两个或两个以上生物带的化石混合共生的现象本身即代表了一种典型的凝缩作用。因此,Comes 等(1994)^[7]提出了三种类型的凝缩作用:地层的凝缩作用,是由于沉积作用速率较低或为零的情况下,岩石体的厚度比相同时限的地层要薄所代表的凝缩作用过程;沉积物的凝缩作用,是指较低的堆积速率在等时限内沉积物厚度减小所产生的凝缩作用过程;埋藏凝缩作用,在沉积物供应不充分的非补偿环境中,不同生物化石带的化石共生而代表的凝缩作用过程。

不管是从什么角度来考虑凝缩作用,在碳酸盐台地中,由于海平面相对上升速率超过其生产和堆积速率,环境的突然加深将使沉积速率突然变低,而形成非补偿环境,结果就产生凝缩作用,从而形成凝缩段直接覆盖在浅水台地碳酸盐沉积之上,二者之间将产生一个沉积间断面,该间断面即为淹没不整合面。随着海平面上升速率的减小,沉积环境逐渐变浅,碳酸盐生产和堆积速率增大,又形成以浅水碳酸盐沉积为特征的 HST 单元。这一个“淹没加深—逐渐变浅”的过程即形成淹没不整合型三级旋回层序。

但是台地碳酸盐的生产和堆积速率常常大于三级海平面变化的上升速率,因此淹没不整合型三级旋回层序的形成条件是三级海平面变化的相对快速上升。能够造成台地淹没的

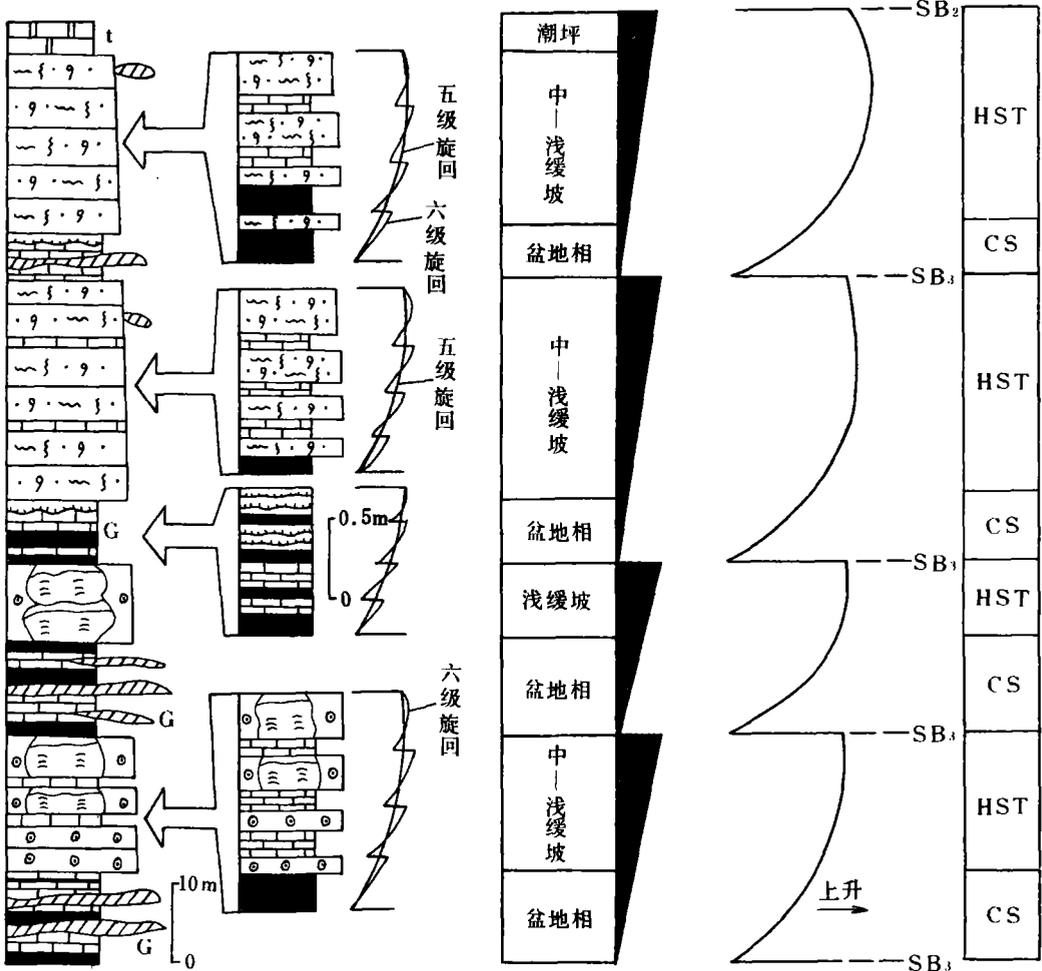


图6 三级旋回层序的相序特征——以山西浑源悬空寺剖面为例

t为潮坪相白云岩;G为发育海绿石生物屑灰岩透镜体的地层;SB₂代表淹没不整合型界面;SB₃为类型I (Vail等,1977,1988)暴露间断面;CS为凝缩段;HST为高水位体系域(岩性符号同图3)

Fig. 6 Facies sequence models of the Late Cambrian third-order cyclic sequences of drowned nonconformity type in the northern part of North China, an example from the Xuankongsi section in Shanxi

t=tidal-flat dolostone;G=strata in which the glauconitic bioclastic limestone lens are developed; SB₂=drowned unconformity boundary;SB₃=type I (Vail et al.,1977,1988)exposure-punctation surface;CS=condensed section;HST=highstand systems tract(Lithologic symbols as in Fig. 3)

情况,大多与其它地质事件有关,如地壳沉降速率较大,叠加于其上的三级海平面上升速率可能会超过台地碳酸盐堆积速率而产生台地淹没事件。上文所述的华北北部晚寒武世的情况即为该类情况;与大洋的大规模火山活动有关的三级海平面上升,也会造成台地淹没,我国南方二叠纪末长兴组台地碳酸盐的被淹没可能属于这类情况。其他如气候进入冰期,板块运动使碳酸盐台地进入高纬度区,碳酸盐生产和堆积速率大大降低,哪怕是海平面的缓慢上升也会产生台地淹没。

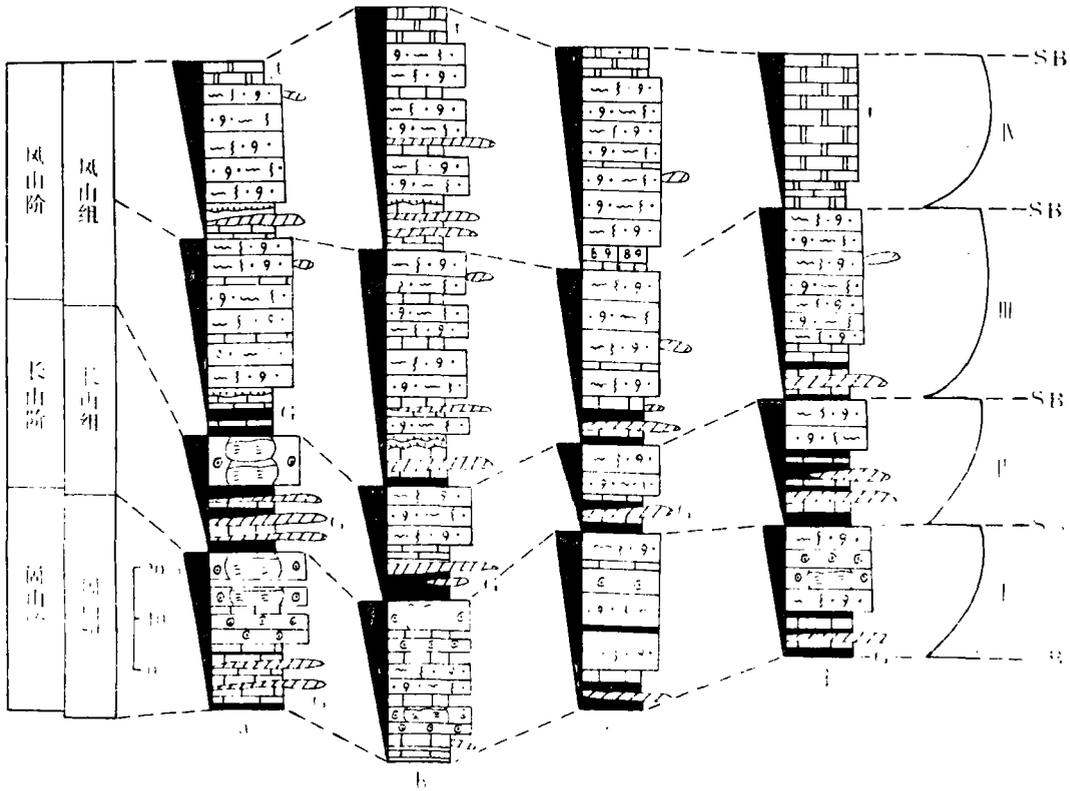


图7 华北北部晚寒武世三级旋回层序的横向对比

a. 山西浑源悬空寺剖面, b. 北京西山剖面, c. 河北保定清醒剖面, d. 河北兴隆扁担沟剖面; t 为潮坪相白云岩; G 为发育海绿石生物屑(壳)灰岩的地层(其它岩性符号同图3和图6); I、II、III、IV 分别代表四个三级旋回层序

Fig. 7 Horizontal correlation of the Late Cambrian third-order cyclic sequences in the northern part of North China

a=Xuankongsi section in Hunyuan, Shanxi; b=Xishan section in Beijing; c=Qingxing section in Baoding, Hebei; d=Biandanhe section in Xinglong, Hebei; t=tidal-flat dolostone; G=strata in which the glauconitic bioclastic limestones are developed(Other lithologic symbols as in Figs. 3 and 6); I, II, III and IV represent four third-order cyclic sequences

另外,从上文所述的华北北部晚寒武世的旋回层序特征表明,图3和图4所示的米级旋回层序的底部岩相单元也是一种凝缩沉积,是由于高频率海平面变化快速上升产生的“瞬时淹没事件”的产物。

因此,我们不要机械地套用 Exxon 模式所建立的层序地层学模式,地层记录中的沉积作用过程是极其复杂的,具体情况具体分析才能更真实地揭示其本质。

4 结语

1. 淹没不整合型三级旋回层序是特殊背景下的产物,在碳酸盐台地中较为普遍。

2. 凝缩段不一定都发育在最大海泛期。从更通俗的涵义上理解,凝缩段是一种分布广泛、厚度不大的远洋及半远洋慢速沉积,是浅水沉积物中包含的深水沉积物夹层。由于海平面变化存在不同的周期和级别,因而“凝缩段”也存在级别归属问题。

3. “岩性、岩相、相序”是识别不同级别旋回层序的关键,这也是沉积学和地层学研究的核心内容。

4. 淹没不整合型旋回层序的相序特征表明,地层记录中的间断面除了“暴露间断面”(层序地层学定义的类型 I 及类型 II 界面)外,还有“加深饥饿间断面”,后者同样也可以作为层序界面。

主要参考文献

- 1 梅冥相,碳酸盐台地的层序地层格架及旋回地层级次,《岩相古地理》1992,第十二卷第 2 期
- 2 梅冥相、周丕康,复合海平面控制下的碳酸盐向上变浅层序——以贵阳地区三叠系大冶灰岩为例,《岩相古地理》1994,第十四卷第 2 期
- 3 梅冥相等,碳酸盐异成因复合海平面变化旋回层序——以北京西山张夏组为例,《桂林冶金地质学院学报》1994,第 2 期
- 4 梅冥相等,克拉通盆地的地层层序格架,《贵阳地质》1994,第 1 期
- 5 Goldhammer, R. K. et al. Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1990, 102, 535—562
- 6 Schwarzacher, W., *Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory*. Elsevier, Amsterdam, 1993, p. 225
- 7 Comez, J. J. et al., Condensed processes in shallow platforms. *Sedi. Geo.* 1994, 92, 147—159

THE THIRD-ORDER CARBONATE CYCLIC SEQUENCES OF DROWNED UNCONFORMITY TYPE WITH DISCUSSIONS ON “CONDENSATION” OF CARBONATE PLATFORMS

Mei Mingxiang

China University of Geosciences, Beijing

ABSTRACT

Different from the type I (LST + TST + CS + HST) and type II sequences (SMT + TST + CS + HST) which are defined by sequence stratigraphy, the third-order carbonate cyclic sequences of drowned unconformity type is marked by “CS + HST” successions in which a condensed section lies directly the sequence boundary, and the basal sequence boundary is a drowned unconformity surface or a deepened starved punctuated surface distinguished from the type I and type II sequence boundary created by the exposure-punctuation events. This type of carbonate cyclic sequences is the products of the condensation processes on the carbonate platforms that is produced by the platform drowning event, and is characterized by a generally asymmetrical upward-shallowing facies sequence.

The characteristics of the four Late Cambrian third-order carbonate cyclic sequences of drowned unconformity type in the northern part of North China indicate that the platform drowning events and concomitant condensation are not typical of third-order cyclic sequences, they often occur in the high-frequency sea-level changes. It follows that the condensed sections ought to belong to the cyclic sequences of various orders, which are not only a genetically composite unit of the third-order cyclic sequences.

Key words: drowned unconformity, cyclic sequence, condensation