碳酸盐异成因复合海平面变化旋回层序

一以北京西山张夏组为例

梅冥相 罗光文 苏德辰

(中国地质大学,北京,100083)

摘 要由于碳酸盐沉积作用与海平面变化存在有极其敏感的响应,不同级 次的海平面变化旋回将形成不同级次的碳酸盐旋回层序,它们的相互叠加即 形成异成因复合海平面变化旋回层序。张夏组灰岩大致构成1个三级旋回层 序;3个四级旋回层序;60余个米级旋回层序。三级旋回层序及四级旋回层 序均由其规则的米级旋回层序的垂直叠加形式来加以识别。 主题词 碳酸盐;寒武系/旋回层序;复合海平面变化;张夏组 中图号 P 588.245

在碳酸盐沉积作用过程中,海平面变化、构造沉降以及沉积物堆积作用等地质营力的 复杂的相互作用,是决定和形成公里级和米级旋回层序的主要地质营力。复合海平面变化 是指叠加在不同频率以及不同变化幅度的相对海平面变化,由复合海平面变化旋回所形成 的旋回层序称复合海平面变化旋回层序。复合海平面变化(composite sea-level change) 这一概念由 Goldhammer 等(1990)提出,相似的概念被 Miall(1984)等称为"旋回含 旋回(cyclewithin cycle)。碳酸盐沉积作用强烈地受到海平面变化的影响,从而形成不同 旋回级次的地层层序及其有序的垂直叠加形式。现以北京西山寒武系张夏组为例,作进一步阐述。

1 碳酸盐异成因复合海平面变化旋回层序

北京西山张夏组由鲕粒灰岩、含生物潜穴的薄层泥晶灰岩、含粉砂及泥质物的泥晶灰 岩及少量钙质页岩组成。从下至上其岩石组成单元变化特征为:(1)陆源沉积物(粉砂和 泥)减少而碳酸盐沉积物增加;(2)薄层泥晶灰岩及含粉砂质泥质泥晶灰岩变薄而鲕粒灰 岩变厚;(3)岩石的单层厚度总体向上变厚;(4)从岩石特征所反映的岩相变化分析,从 下至上大致由中缓坡及深缓坡演变为鲕粒浅滩(或浅缓坡),由此而构成一个时限达 6~7 Ma 的总体向上变浅序列,该总体向上变浅序列即构成一个三级旋回层序(相当于 Vail, Sarg 等 1988 年所定义的"层序")。

根据野外实地观察,张夏组中发育8种类型的米级旋回层序(图1),这些不同类型 的米级旋回层序与古地理环境的分布即构成一个变化谱系。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.

¹⁹⁹³年2月8日,5月27日改回。

第一作者简介:梅冥相,男,1965 年出生,博士,沉积学及古地理学专业。

1.1 碳酸盐米级旋回层序的成 因类型及可能形成机制

从图 1 中可看出,根据所处的古地理背景可以把发育于张夏 组中的米级旋回层序分为以下 3 种类型:

(1) 深缓坡型(图1中b₁ 和b₂),该类型米级旋回层序的 特征是从下至上碳酸盐组分增 多,其沉积物以慢速沉积的远洋 及半远洋沉积物为特征,属风暴 浪基面之下的深水宁静水体环境 的产物。

(2) 中缓坡型(图1中 a₁)
 至 a₄),这种类型米级旋回层序
 的顶部单元为中薄层鲕粒灰岩,
 下部单元为薄层泥晶灰岩或含粉



Fig. 1 The spectrum of carbonate meter-scale cyclic sequence developed in Zhangxia Formation of middle Cambrian

1一具交错层理的块状鲕粒灰岩; 2一鲕粒灰岩; 3一含生物潜穴的薄层泥 晶灰岩; 4一粉砂质泥质条带泥晶灰岩; 5一钙质泥岩。 图中: b₁及 b₂为深缓坡型; a₁至 a₄为浅缓坡型; a₅及 a₆为浅缓坡型

砂质泥质条带泥灰岩、泥晶灰岩,形成一种向上变浅、向上变厚、向上变粗的总体特征。 这种类型的米级旋回层序是处在正常浪基面之下,风暴浪基面之上的中缓坡环境下的产物,起因于高频率海平面变化旋回(可能为0.1 Ma级别)的海平面上升,所造成的环境 加深效应的延续时间要比浅缓坡长,因而形成的米级旋回层序的下部深水岩石单元较厚。 其上部岩石单元——鲕粒灰岩,随着古地理背景由深变浅而由薄变厚,而且该类型米级旋 回层序的鲕粒灰岩单元与下伏深水半深水相岩石呈突变接触,其鲕粒类型既有高能同心 鲕,也有低能放射鲕,另外还含有少量单晶鲕和多晶鲕,表明它是异地迁移的产物,即由 于在高频率海平面变化的下降时期,沉积物容纳空间的增长速率减少而造成的鲕粒滩进积 作用的结果,有些是呈颗粒流形式向深水区进积。

(3) 浅缓坡型(图1中a₅和a₆),其下部单元为含生物潜穴的薄层泥晶灰岩(a₆)或钙 质泥岩(a₅),上部单元为块状交错层理鲕粒灰岩。上部单元厚度为3~6m,下部单元厚一 般为几厘米以下,从而呈向上变浅、变粗、变厚的总体特征。它们是处于正常浪基面之上 的潮下高能动荡浅水环境的产物。由于所处的古地理背景较浅,高频率海平面变化的上升 时期造成的环境加深效应的持续时间不长,从而形成较薄的深水半深水相下部单元。当高 频率海平面变化旋回的海平面上升速率逐渐减小并进入停滞期和下降期,又开始了均衡堆 积作用过程,除了正常的波浪及潮汐作用机制外还产生向深水区的进积作用。

图 1 中的 8 种米级旋回层序,在均匀沉降的构造背景下,由于高频率海平面变化旋回 所产生的环境变化效应,不同的古地理背景将产生不同的环境变化效应,从而形成不同类 型的岩石单元,最后产生一个有规律变化的米级旋回层序谱系。在一个长周期海平面升降 变化过程,叠加于其上的高频率海平面变化也产生不同的环境变化效应,最终形成一个垂 向上有序的米级旋回层序叠加形式,而这个米级旋回层序的有序叠加形式即成为露头上识 辩长周期旋回层序的基础。



图 2 张夏组构成的复合海平面变化旋回层序

(米级旋回层序类型同图 1) Fig. 2 Cyclic sequence formed by composite sea-level change that is consist of Zhangxia Formation of middle Cambrian

1.2 复合海平面变化旋回层序

从图 2 中可以看出,张夏组由 65 个左右的米级旋回层序反复垂直叠加而成。由下至 上构成一个总体向上变浅序列,即组成 1 个三级旋回层序,其中又包含有 3 个次一级的向

上变浅序列即四级旋回层序。从下到上,下部地层构成的四级旋回层序相对低水位体系域 (RLST),由深缓坡型米级旋回层序(b1和 b2)组成,这种深缓坡型米级旋回层序反复叠 加所构成的深水慢速沉积特征也可以作为四级旋回层序的凝缩层(CS),其相对高水位体 系域(RHST)主要由中缓坡型米级旋回层序(a1、a2、a3)反复叠加而成,该四级旋回 层序大至又包含有4个五级旋回层序,每一个五级旋回层序由4个左右的米级旋回层序组 成一个向上变浅序列;第2个四级旋回层序包含有2个五级旋回层序,其相对低水位体系 域(RLST)或凝缩层(CS),主要由深缓坡型米级旋回层序组成,相对高水位体系域 (RHST) 主要由中缓坡型米级旋回层序(a2、a3) 反复垂直叠加而成; 第3个四级旋回层 序包含有 9~10 个五级旋回层序,其凝缩段(CS)由深缓坡型米级旋回层序(b₁, b₂) 构成, RLST 主要发育中缓坡型米级旋回层序 (a_1, a_2, a_3, a_4) , RHST 主要发育浅缓坡 型米级旋回层序,该四级旋回层序的凝缩段同时又是三级旋回层序的凝缩段。也就是说, 由张夏组构成的三级旋回层序(相当于层序地层学定义的"层序")的海侵体系域(TST) 包含 2 个四级旋回层序, 第 3 个四级旋回层序的 RLST 及 RHST 单元构成三级旋回层序 的高水位体系域(HST)。但是该三级旋回层序既不属于层序地层学上定义的I型层序, 也不属于Ⅱ型层序,因为其底界面是一种加深饥饿问断面(图3),其特征是张夏组底部 地层的深缓坡相沉积直接覆盖在下伏徐庄组块状鲕粒灰岩之上,其间缺乏明显的暴露剥蚀 标志、反而在徐庄组滩相块状鲕粒灰岩之顶面为一硬底构造面、其沉积间断是由于海平面 快速上升造成环境加深, 而沉积物生产及堆积速率大大降低所产生的滞后间断。其顶界面 也是一个加深饥饿间断面,表现在张夏组鲕粒滩的消亡,而晚寒武世崮山组底部的深缓坡 相沉积直接覆盖在滩相鲕粒灰岩之上。



图 3 三级旋回层序的顶底界面特征 (A示底界面, B示顶界面) Fig. 3 Top boundary (B) and bottom boundary (A) of third-order cyclic sequence

张夏组鲕粒滩的发育过程是在缓坡型台地的古地理背景下,经过若干次隶属于不同频率的海平面变化旋回所造成的间断加深——均衡堆积及进积作用过程所形成,并非是一个持续高能动荡环境的产物,其中所发育的不同级次的旋回层序是异成因机制控制下的自旋回沉积过程的产物,即不同周期或频率的海平面变化是该复合海平面变化旋回层序的主要

地质营力。下面将根据张夏组构成复合海平面变化旋回层序特征,讨论有关在露头上研究 层序地层或者建立不同旋回级次的地层层序格架时所要注意的问题。

2 异成因碳酸盐旋回层序

2.1 碳酸盐沉积作用的非渐变沉积过程

张夏组中鲕粒滩的发育过程经过了若干次加深间断--均衡堆积及进积作用过程,并非 是一个持续动荡高能环境产物。也就是说地层堆积作用过程中包含有许多间断事件。

根据 Osleger 等(1990, 1991)的研究,由于中寒武世不是地球历史上的"大冰期", 地层记录中所保留的最短周期的旋回性记录可能为 0.1 Ma 级别的短偏心率旋回——六级 旋回层序,因此张夏组中的米级旋回层序也就属于 0.1 Ma 级别。从图 1 可看出,大致 4 个米级旋回层序组成一个序列,即五级旋回层序(0.4 Ma 周期级别),而张夏组包含 65 个左右米级旋回层序,代表地层分布时限为 6~7 Ma。如果上述推断是正确的话,那么张 夏组的平均堆积速率为 1~2 m/0.1 Ma,而浅缓坡型米级旋回层序中的鲕粒灰岩堆积速 率大于 5~6 m/0.1 Ma,虽然在张夏组中没有发现明显的暴露间断,但是,地层平均堆 积速率与鲕粒灰岩堆积速率之差异表明了地层堆积作用不是一个连续的逐渐沉积,其中包 含有间断面,是一个非渐变沉积过程。

地层沉积作用的间断面主要有两类,一种是暴露间断,一种是加深饥饿间断。前者是 由于相对海平面下降使沉积基底露出水面,最后使沉积物堆积速率和生产速率降低接近于 零或停止所产生的间断。后者是由于相对海平面上升速率超过沉积物生产和堆积速率,造 成水体环境快速加深而形成淹没事件,沉积物生产和堆积速率降低所造成的时间滞后效 应,最终也形成沉积间断。由于海平面变化具有不同的周期或频率,由其所形成的沉积间 断的规模与幅度也隶属于不同级次的旋回层序之中,在研究地层的旋回性沉积作用时应特 别注意。

海平面快速上升所造成的沉积间断面之上常发育"凝缩性质的沉积物",即相对较深水的慢速沉积,如张夏组中各种米级旋回层序的下部岩石单元(薄层泥晶灰岩、含粉质泥晶灰岩、泥灰岩及钙质泥岩),地质学家常称之为"滞后沉积"(lag deposits),以示与长周期旋回层序(三级、四级)的"凝缩层"或"凝缩段"相区别。也就是说,由相对深水慢速沉积构成的"凝缩性质沉积物"并非只有三级旋回层序或四级旋回层序所独有,只不过由于隶属于不同旋回级次的海平面升降变化,其分布规模、范围、厚度不同而己。

以上特征表明,在露头上根据地层的旋回性沉积记录进行海平面变化分析,以及建立 地层层序格架时,若机械地套用层序地层的方法,即机械地去识别层序界面、划分体系域 或凝缩段,是困难的而且可能会得出一些不符合自然事实的结论,因此在露头上分析不同 旋回级次的地层层序格架时,应采用如下方法比较可行呢?

2.2 米级旋回层序及其有序叠加形式——露头层序地层研究的基础与关键

2.2.1 不同歲回级次的地层层序的划分方案 地层中的旋回性记录早就为一些地质学家 们所认识,早在1895年G.K.Gilbert就认为一定的韵律层理型式记录了敏感的地球轨道 韵律的反应。由于地质学家大都是研究产物而反推其形成过程,加上地层记录的复杂性及 不完整性,到本世纪七十年代末,许多地质学家都还认为"旋回"这一概念牵强附会,并认 为轨道循环对气候和沉积物的影响是模糊不清的。自 Vail 等(1977)创立了层序地层学 这一分支学科以后,以及后来他和他的同事们如 Haq 等(1988) 推出一系列成果,使地 质学家们重新认识了 Gilbert(1895) 所提出的问题的重要意义,并且对 Sander 准则(空 间上的旋回性代表了时间上的旋回性,但空间上旋回性的缺乏并不代表时间上旋回性的缺 乏,Sander 等,1936) 的重新肯定,自八十年代至今即产生了可实用的旋回地层学。这 种旋回的主要起因是相对海平面变化,造成海平面变化的因素很多,主要可以分为两类, 冰川型海平面变化及构造型海平面变化。前者是指由于地球轨道效应造成气候(主要指地 球接收的太阳辐射量)的旋回性变化导致极地冰盖的周期性消长,从而使海水体积发生周 期性变化而产生的海平面变化;后者是指构造运动和构造作用,如泛大陆的形成和分裂、 大洋中脊扩张体系的产生、板块上升与沉降等造成洋盆体积的变化而产生的海平面变化。 前者主要形成高频率海平面变化,后者形成低频率或长周期海平面变化。

关于地层旋回性记录的级次有多种划分方案(Vail 等, 1977; Miall 等, 1984; Carlton, 1990),综合前人的意见以及自己实践工作的体会,笔者把地层旋回级次划分为 七个级次:

[
 松造海平面变化
 [
 书造海平面变化
]
 [
 书选海平面变化
]
 [
 二级旋回(10~100Ma)(大层序)
 三级旋回(1~10Ma)(层序)
 四级旋回(0.5~3Ma)(次层序)
 因级旋回(0.4Ma)(准层序组)
 六级旋回(0.1Ma)(准层序)
 七级旋回(0.02Ma或0.04Ma)(韵律层)
]

在该划分方案中,五级和六级旋回与米兰柯维奇机制有关(即地球轨道效应),五级 相当于长偏心率旋回,六级相当于短偏心率旋回,七级相当于黄赤交角旋回(0.04 Ma) 或岁差旋回(0.02 Ma)。四级旋回层序是三级旋回层序的再划分,它在形态上及组成特 征上与三级旋回层序相似,只不过分布范围稍小,其界面的间断程度或幅度稍小(如图 2 张夏组中包含的3个四级旋回层序),其组成单元分为相对高水位体系域及相对低水位体 系域。三级旋回层序与 Vail 等(1977, 1988)定义的"层序"是相应的周期性时间过程的 产物,故把地层的旋回性沉积记录称为"旋回层序"(cyclic sequence),并赋予"旋回级次" 而使之具体明了。

米级旋回层序是指厚数十厘米至数米高频率海平面变化旋回层序的总称。具体在研究 不同地质时代的地层中,米级旋回层序属何级要根据其叠加形式等进行推断,如张夏组中 的米级旋回层序(图1、2)可能属六级旋回层序。

2.2.2 碳酸盐沉积作用与海平面变化的响应及米级旋回层序有序叠加形式的原因 通常 由构造沉降和海平面上升的累积效应所引起的相对海平面上升将对碳酸盐沉积作用导致以 下三种情况:(1)碳酸盐台地被淹没,它是由相对海平面上升速率超过碳酸盐堆积速率而 形成,其特征是较深水的沉积物直接覆盖在浅水沉积物之上,其接触面上发育硬底构造, 并且其上发育凝缩性质的沉积物;(2)只有台地上快速生长的边礁和内部斑礁与海平面的 上升速率一致,而台地的其余部分仍被淹没;(3)台地平顶与海平面上升保持一致,这时 形成浅水沉积物,厚度至少与海平面上升的高度保持一致。

海平面的相对下降可使陆架和台地上发育喀斯特化及古土壤。同时在台地凹陷地带的

半封闭盆地中可沉积"蒸发盐",在台地边缘产生滑塌角楔岩(即低水位楔)。所有这些沉积作用都是由地壳上升或海平面下降速率高于沉积速度而形成。海平面下降同时伴随着整个台地范围的淡水成岩作用,如白云石化作用等。

另外,碳酸盐沉积作用与古地理背景有关,不同沉积环境将形成不同的岩石类型,这 主要是与造岩生物的分布相联系所致。其沉积物主要来源于原地,这与陆源碎屑沉积有区 别。

正是由于碳酸盐沉积作用对海平面变化的强烈响应,在地层记录中才形成不同旋回级次的地层层序及其有规律的垂直叠加形式。正如 Goldhammer 等(1990)及 Read (1988,1989)、Osleger 等(1990,1991)所指出的那样,在一个长周期海平面变化旋回 (三级、四级)控制下的高频率海平面变化所形成的复合海平面变化过程中,由其所形成的复合海平面变化旋回层序从下到上由以"淹没节拍"为主要特征变为"暴露节拍"为主要特征。这是因为在长周期海平面变化的相对上升阶段,沉积物容纳空间的增长速率大于沉积物的堆积速率,因而在该阶段形成的米级旋回层序间的界面以瞬时淹没形成的"加深饥饿间断面"为特征,不发育暴露标志;在长周期海平面变化的停滞期及下降期,沉积物容纳空间的增长速率小于沉积物堆积速率,因此叠加于其上的高频率海平面变化的海平面下降,将使沉积基底周期性地暴露于水面,米级旋回层序间的界面以"暴露间断——加深作用"为特征。

如张夏组构成的三级旋回层序(图2),其中,下部地层以深缓坡及中缓坡型米级旋回层序(b₁、b₂和 a₁至 a₄)为主,米级旋回层序间的界面特征缺乏任何暴露标志,而以加深饥饿间断面代表的"淹没节拍"为特征;在其高水位体系域(HST),也是第3个四级旋回层序的相对高水位体系域(RHST)中,以发育浅缓坡型米级旋回层序(图1中 a₅、a₆)为特征,这种浅缓坡型米级旋回层序的均衡堆积岩石单元——块状鲕粒灰岩的顶部常出现局部白云石化,发育淡水淋滤作用形成的单晶鲕和多晶鲕,表明米级旋回层序的顶界面为一"瞬时暴露"面,然后伴随着另一个高频率海平面变化旋回的海平面上升又形成一个加深饥饿间断及凝缩滞后沉积层。

2.2.3 露头层序地层学及츊回地层学的研究方法简介 笔者认为,在露头研究及岩 心观察中,不应该机械地套用层序地层学的方法,即先确定层序界面及体系域划分,从而 建立地层层序格架。而是应该把时间上的旋回性及其在空间上的产物有机地结合起来,分 析不同周期或频率的旋回性记录,从小到大,从点到面,最后建立不同旋回级次的地层层 序格架。这种方法大致包括以下几个步骤:

(1) 踏勘剖面,初步确定米级旋回层序类型。把米级旋回层序作为基本工作单元,确定出由不同类型的米级旋回层序的发育特征所限定的岩系。

(2) 从垂向上详细观测米级旋回层序的组成岩石单元的岩性、岩相特征、厚度、颜色等,并采取样品辅之以室内研究。

(3) 在前两步工作的基础上,观察和分析米级旋回层序。从而得出一个点的不同旋回级次的地层层序特征。

(4) 把各个露头点的研究结果进行空间对比,从而得出研究区域内不同旋回级次的地 层层序格架及其空间变化规律。

如果上述工作与详细的生物地层工作密切配合,既可以确定出有机生物体系与无机岩 (C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www. 石体系之间的变化和联系,又可使得出的不同级次的旋回层序,成为进行大规模区域对比 乃至全球对比的"交流工具"。

地层本身是地质过程的百科全书,只有把它所包含的生物、物理、化学等的变化规律 尽可能地解析出来,才能取得更加符合自然事实的研究资料。

张夏组是一个发育于缓坡台地边缘的颗粒灰岩岩系,该岩系即构成1个三级旋回层 序。在进行野外工作时,首先踏勘确定出该岩系的米级旋回层序类型,把每一个米级旋回 层序作为基本工作单元,即作为测制剖面的"层",详细观察构成米级旋回层序的成因岩石 单元的岩性、结构、构造及厚度。把详实的野外观察结果与室内分析(如岩石微相研究) 结合起来,即得出了米级旋回层序的有序叠加形式,从而把由该三级旋回层序划分出3个 四级旋回层序及15个左右的五级旋回层序。遗憾的是没有同时进行详细的生物地层工 作,更系统的更大范围的工作仍在进行中。

本文是在孟祥化教授的启发和帮助下完成的,顺此致谢。

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, (2)
- 2 张选阳译编,李文汉校 层序地层及海平面变化 岩相古地理, 1989, (1)
- 3 陆元法译编, 李文汉审校, 旋回地层学. 岩相古地理, 1989, (1)
- Aigner, T. et al., Stratigraphic modelling of epicontinental basin: two applications. Sedi. Geo., 1990, 69 (3~4): 167~190
- 5 Anderson, E. T. and Goodwin, P. W. The significance of meter-scale allocycles in the quest for a fundamental stratigraphic unit. Journal of Geo. Soc., 1990, 147: 507~518
- 6 Barnary, R. J. and Read J. F., Carbonate ramp to rimmed shelf evolution: Lower to Middle Cambrian continental margin, Virginia Appalachians. Geol. Soc. of Am. Bull., 1990, 102 · 391~404
- Brett, C. E. at al., Sequences, cycles, and basin dynamics in the silurian of the Appalachian foreland basin. Sedi.
 Geo., 1990, 69 (3~4): 191~244
- 8 Elrick, M. and Read J. F., Cyclic ramp to basin carbonate deposits, Lower Mississippian, Wyoming and Montana: A combined field and computer modelling study. J. Sedi. Petro., 1991, 6 (7): 1194~1224
- 9 Goldhammer, P. K. et al. Pepositional cycles, composite sea-level changes, cyclic staclcing patterns, and the hierarchy of stretigraphic forcing. Geol. Soc. of Am. Bull., 1990, 102: 535~562
- Miall, D., Stratigraphic sequences and their choronostratigaphic correlation. J. Sedi. Petrol., 1991, 61 (4): 497
 ~ 505
- Osleger, D. A., Subtidal carbonate cycles: implications for allocyclic versus autocyclic controls. Geology, 1990, 19:917~920
- 12 Osleger, D. A. et al. Relation of custasy to stacking patterns of meter-scale carbonate cycles, Late Cambrian, U. S. A., J. of Sedi. Petro., 1991, 61 (7): 1225~1252

CARBONATE ALLOGENIC CYCLIC SEQUENCE OF COMPOSITE SEA–LEVEL CHANGE–EXAMPLE FROM THE ZHANGXIA FORMATION OF MIDDLE CAMBRIAN IN WESTERN HILL OF BEIJING

Mei Mingxiang Luo Guangwen Su Dechen (China University of Geosciences, Beijing)

Abstract

There is a sensitive response between carbonate sedimentation and sea-level changes, the sea-level changes of various orders of cycle forms the carbonate cyclic sequence of various orders, so cyclic sequence of composite sea-level is developed in carbonate strata. For example, about 65 meter-scale cyclic sequence are discerned in Zhangxia Formation. In term of the regularly vertical stacking pattern of meter-scale cyclic sequence, the third-order cyclic sequence which is constituded by the strata of Zhangxia Formation can be subdivided into three forth-order cyclic sequences, all of them are characterized by upward shallowing.

Keywords carbonate; Cambrian system / cyclic sequence; composite sea-level changes; Zhangxia Formation