

沉积旋回、复合海平面变化、旋回 叠加型式及地层力等级

周少平 陈荣坤 编译

(中国地质大学 北京)

[内容提要] 海平面升降、台地沉降和沉积物的聚集是确定千米级(沉积层序级)和米级(沉积旋回级)地层组合的主要因素。本项研究中特别注意了具有不同频率(定为级)和不同振幅并相互叠加的海平面波动及其在联系旋回地层和层序地层时所起的作用。借助计算机模拟,对阿尔卑斯三叠纪台地碳酸盐地层进行了详细分析,即对低频的第三级(1—10Ma)沉积旋回和组成其中的高频第四级(0.1—1Ma)和第五级(0.01—0.1Ma)旋回之间的关系进行了探讨。在此基础上,发现存在着一个由复合海平面升降所驱动的地层力等级,它导致形成有序的叠加型式。这一型式由典型的高频第四级、第五级浅水碳酸盐旋回组成并受低频的第三级海平面相对变化的影响。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,而且这些规律性变化的存在不受产生高频旋回机制的控制。这一方法对于联系米级旋回地层和地震级层序地层具有重要意义。

本文介绍了阿尔卑斯山区三叠纪沉积建造的两个实例,即拉丁期 Latemar 建造和诺利期的 Dolomia Principale 单元。它们的规律性的高频旋回叠加存在于第三级层序之中,反映了与地层力驱动等级一致的短期高频海平面升降和长期低频海平面升降之间的相互作用。这一结论通过计算机模拟得到了充分证实。此外还介绍了另一个阿尔卑斯三叠纪实例,即诺利期 Lofer 旋回层,尽管它存在有复合高频海平面升降变化,但是既没有发现高频旋回叠加型式的规则层序,也没有发现具有复合韵律的地层记录。从上述实例中,笔者认为(1)局部的构造力可以使台地沉积出现短期偏差;(2)不同级次的高频海平面振荡在振幅上的巨大差异是复合韵律缺失的主要原因;(3)对复合海平面相对变化以及地层驱动力等级潜在意义的理解将旋回地层学和层序地层学联系起来。

1 概述

在众多控制浅海碳酸盐沉积体态和地层学特征的变量中,海平面升降、台地沉降及沉积作用是控制碳酸盐台地沉积相分布的最为关键的因素。被动大陆边缘和克拉通盆地长期的沉降速率为 1—25cm/ka,呈缓慢的指数性规律变化,而典型的浅海台地碳酸盐沉积速率超过构造沉降速率。另一方面,海平面变化可能会以高频(10^4 — 10^5 年)快速(10/ka)反复波动,其振幅可以超出碳酸盐的生产率。由此产生的地层记录是旋回层序的组成部分之一。必须注意的是,不同级次的海平面升降都有其特征的振幅和变化速率,反映其驱动机制或者是冰川-海平面变化,或者是构造-海平面变化。这些不同级次的海平面变化相互叠加而产生复杂的地层序列。笔者认为复合海平面升降的概念在评价和预测台地碳酸盐地层时是至为关键的因素。尤其在浅海碳酸盐台地沉积演化中,第三级(1—10Ma)、第四级(0.1—1Ma)和第五级(0.01—0.1Ma)海平面升降旋回的复合效应是确定千米级和米级地层组合的主要因素。

① 本文于 1992 年 6 月 9 日收稿

复合海平面变化和沉积旋回叠加型式之间的联系是本文的焦点。

阿尔卑斯南部山区(意大利)和利默斯通北部山区(奥地利)大量出露了以米级旋回性沉积为特征的厚达千米的三叠纪碳酸盐。最近的研究说明,这些旋回性沉积最本地受米兰科维奇带(10^4 — 10^5 年)内复合海平面变化的控制。工作中我们探讨了高频复合海平面变化作用于浅水碳酸盐台地旋回沉积所产生的可能结果,并且特别注意高频旋回在垂向上的叠加型式以及高频—低频沉积层序之间的本质联系,从而提供了三叠纪振荡的海平面规则脉动在地层记录中被捕捉和逸失的证据。

2 韵律性沉积作用和非韵律沉积作用——Sander 法则

解决由相对海平面变化所驱动的高频旋回性问题的关键在于弄清沉积旋回的地层层序是否为韵律性事件的结果。Sander(1936)在其一篇关于阿尔卑斯山区三叠纪碳酸盐的总结性文章中表述了如下观点:空间上地层厚度的旋回性意味着时间上的旋回性,但是地层记录中旋回性的缺失并不意味着时间旋回性的缺失。这一观点在多年实践中被许多实例所证实。

本文正是在这一理论原则指导下通过计算机模拟解决了阿尔卑斯南部山区三叠纪拉丁期 Latemar 建造和诺利期 Dolomia Principale 单元以及诺利期 Lofers 层序韵律性和非韵律性地层序列的成因问题,并且讨论了它们的控制因素及阿尔卑斯南部山区三叠纪韵律性沉积作用的证据。

在阿尔卑斯南部山区存在安尼期—拉丁期的碳酸盐沉积,即 Latemar 地块核部,它由厚约 800m 并平缓展布的碳酸盐岩组成。台地上部为由大约 500 个拉丁期的单旋回组成的厚约 400m 的沉积物(Latemar 石灰岩),其中含有明显的由于高频海平面振荡而导致的沉积物反复暴露于大气的特征。每一旋回都由平均厚度大约 0.6—0.7m 的底部潮下骨架-岩屑颗粒灰岩和上部厚约 1—15cm 的白云石化颗粒灰岩岩盖构成的层偶组成。这些层偶被分隔成由五部分组成的巨旋回(厚约 5m),每个巨旋回内各个连续的旋回向上依次变薄。旋回重组形成五部分巨旋回的过程表示在 Fischer 图(图 1)中。这一过程已被自相关时间序列分析所证实。

Goldhammer 等(1987)认为,拉丁期 Latemar 台地巨旋回是高频第四级、第五级复合海平面振荡与米兰科维奇天文韵律作用的结果。通过对拉丁期界线的放射性年龄测定,发现单个旋回的平均持续期为 10^4 年,巨旋回持续期为 10^5 年。这一 10^4 — 10^5 年范围内由五部组成的复合频率的不对称海平面振荡是更新世海洋的显著特征。工作中以更新世海平面升降作类比,对 Latemar 旋回地层作出了定量模拟(图 2)。模拟中沉积速率、台地沉降速率、表土形成速率等参数都根据全新世—更新世的碳酸盐沉积体系中各种条件得来。在没有其它可致产生五部分复合海平面振荡的机制存在的前提下,Goldhammer 建议用米兰科维奇力驱动的海平面升降来解释三叠纪 Latemar 台地碳酸盐旋回地层的成因机制。

根据 Bruno Sander 的定义:一个规则的地层序列不可能产生于一个紊乱的时间序列之中,作者把 Latemar 建造的旋回相看作是规则的事件层序(海平面的升降)所形成的韵律性沉积;这一规则的层序是以大约 20,000 年的周期重复发生的,即单个 Latemar 沉积层偶持续时间为 20000 年。这些三叠纪旋回地层序列在连续的剖面中实际上成为 Latemar 沉积韵律的“带状图”记录,这一“带状图”是 Latemar 建造韵律性生长周期的精确记录。Latemar 台

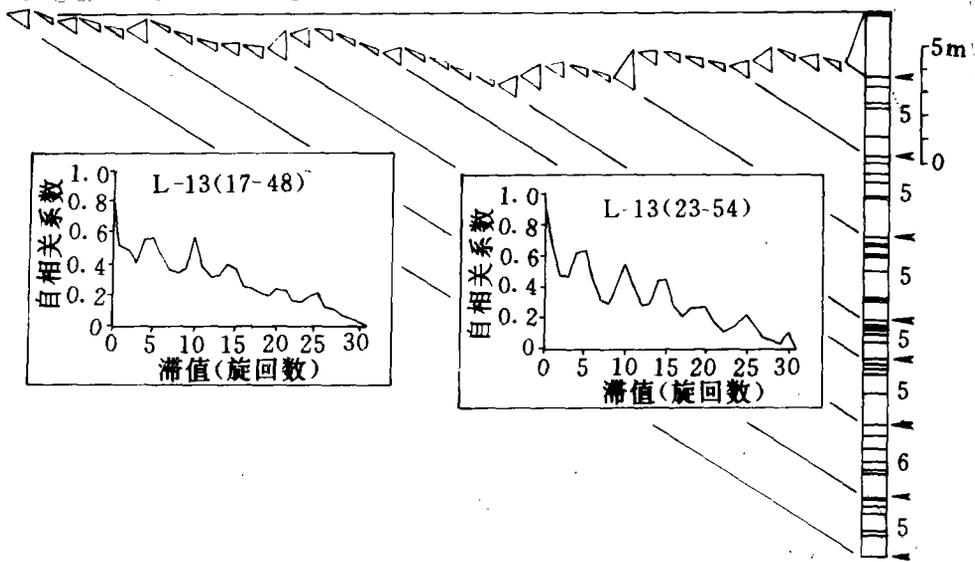


图1. Latemar 沉积上部旋回相中 37 个连续的米级旋回(实测剖面 L-13, 17-53 旋回)的 Fischer 图纵轴代表实测剖面,横轴表示相对时间的增加。连接地层剖面底部和初始时刻的粗斜线代表平均沉降矢量。自相关图(中间插图)指相互之间部分重叠 32 个连续旋回。巨旋回间的界线用剖面中的箭头表示。每两个箭头之间的数字代表表生暴露期间形成的成岩岩盖;白色区域则为旋回潮下部分。沿横轴展布的三角形代表从左向右上升的旋回,每一三角形斜边代表台地平均沉降矢量,直边代表旋回沉积厚度。每个三角形的顶角代表这两矢量之和(据 Goldhammer 等,1987)

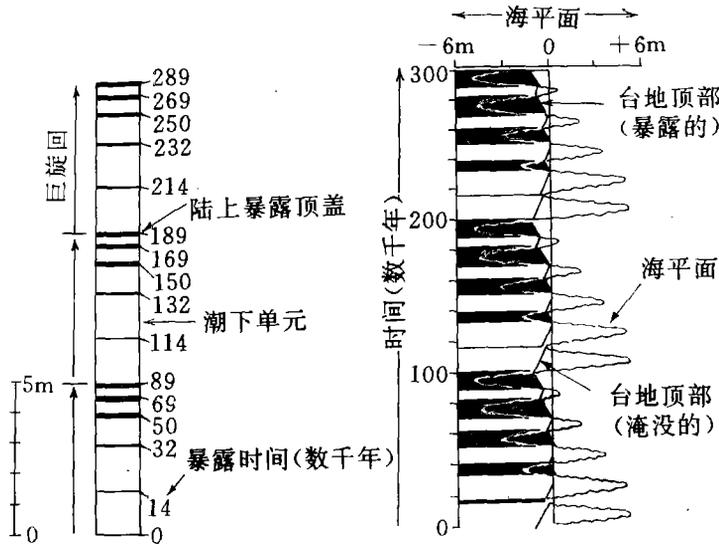


图2 Latemar 台地巨旋回的计算机模拟
地层状标图显示了由五个米级第五级旋回组成的三个完整的第四级巨旋回。右侧曲线图示意运行中复合海平面与沉积作用及台地沉降之间的相互作用

地拉丁期剖面上,第五级旋回最小数目为 488 个,而拉丁期最短持续期为 9.76 百万年,而已经发表的拉丁期放射性年龄资料为 $10 \pm 10\text{Ma}$ 。上述二者之间具有很好的理论吻合性。

3 被捕获的脉动和逸失的脉动:韵律巨旋回、混合巨旋回和凝缩巨

旋回

由 Latemar 层序所揭示的巨旋回规则性重复现象在那些已经研究过的三叠纪旋回性台地沉积中并非普遍存在,而是一个特例,为寻找能够解释这一特殊的证据,作者研究了存在于 Sander 法测中的概念:等间距时间事件可以在地层柱中作为非等间距岩石事件记录下来。

“沉积先生”是设计模拟 Latemar 旋回地层的计算机程序。作者利用它研究了五部分巨旋回结构对台地沉降速率、沉积速率、海平面振荡的周期和振幅等参数变化的敏感性反应。

当一周期为 20,000 年的高频正弦式海平面振荡之上叠加一周期为 100,000 年的低频非对称脉动时,该程序则产生“Latemar 型”旋回地层。非对称波动对重建向上变薄的巨旋回是一必要条件,但是后者振幅必须小于或等于前者的振幅。

为模拟 Latemar 旋回,给定的 $0.10-0.25\text{m/Ka}$ 的沉积速率是很低的,因此,以下的讨论以及由此得出的结论只适用于 Latemar 建造。模式中采用滞后深度这一参数,它是计算机模拟的一个重要方面。滞后深度指表生暴露结束后重新开始的碳酸盐沉积作用所需要的水体的最小深度。在 Latemar 碳酸盐中,许多第五级旋回潮下部分上部含有似核形石滞留沉积砾石的硬底构造表明,在旋回形成期间,沉积作用曾一度中断,因而阻止潮下沉积的滞后深度则补充到高频海平面振荡下降部分。曲线上升部分的滞后深度被固定为与下降部分相同,在每一旋回期间二者都保持恒定。

为了模拟 Latemar 韵律沉积的第四级向上变薄巨旋回,参数之间满足如下条件:台地顶部在每一个海平面振荡期间必须被交替地淹没(图 3,正弦式海平面波动之下的白色区域)和暴露(图 3,波动曲线之下的黑色区域)。如此完整的五部分巨旋回被认为是“韵律巨旋回”(图 3,中图,黑色线条代表暴露顶盖,白色区域为潮下沉积物)。因此,只有当能够使每一个第五级海平面脉动按正常节拍规律被捕捉的所有条件都满足时,这一巨旋回才可以形成。

在计算机模拟实验中,不难诱发基本的向上变薄的巨旋回结构发生变化。已经发现,输入参数的微小扰动可以使海平面脉动逸失,而众多参数中的一些随机变量可以导致捕捉和逸失的脉动的随机分布。研究中作者重视那些有利于逸失的脉动更加系统化分布的条件。我们发现,当平均海平面和其中的第五级振荡高出或低于一个完整的韵律巨旋回发育的最佳范围时,第四级巨旋回的结构才可产生明显变化(图 3)。

当海平面在一个或多个第五级振荡过程中未能下降至台地顶面之下时,由于平均海平面相对上升而没有对应的第五级海平面成分在振幅上的变化,从而导致台地发生长久持续的下沉(图 3,下图)。这些逸失的脉动可以导致不完整的含有两个或多个潮下旋回的巨旋回,每一巨旋回中的旋回数少于 5 个。本文将这种由混合导致产生的比平均复合旋回更厚的不完整巨旋回称为“混合巨旋回”。而当海平面振荡在其一个或多个第五级脉动中低于台地水平面时(图 3,上图),由于海平面相对下降而没有相应的第五级海平面成分在振幅上的相应变化,从而导致台地顶部经历持久的暴露历史。这种逸失的脉动产生不完整巨旋回,其中被记录下来的振荡的潮下部分厚度小于正常值,而在持续的暴露时期,逸失的脉动产物为表土层或帐篷构造顶盖,它出现于层序中每个旋回的顶部(图 3),本文将这种不完整巨旋回称为“凝缩巨旋回”。

计算机模拟实验得出了三个有利于不完整巨旋回发育的条件:(1)主冰期,由于大冰盖的溶化-凝固动力学效应,使得 10^5 年的非对称波动控制了 10^4 年的正弦式波动;(2)复合的

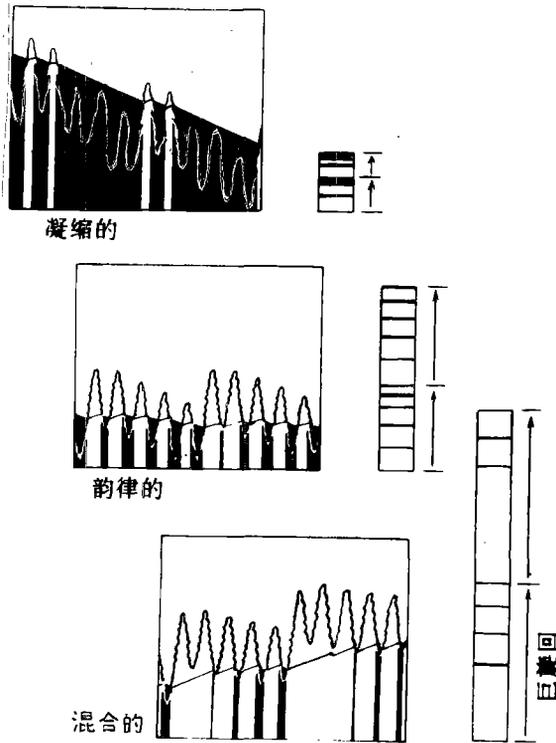


图3 高频复合海平面振荡、台地加积作用(左侧图)及其所导致的巨旋回组合(右侧柱状图)示意图

高频复合海平面变化与第三级趋势线结合,产生三类巨旋回:(1)凝缩巨旋回;(2)韵律巨旋回;(3)混合巨旋回

第五级、第四级海平面振荡对于第三级海平面旋回的叠加能够产生混合巨旋回—韵律巨旋回—凝缩巨旋回的规则层序;(3)台地沉降的不规则脉动与复合高频海平面振荡相互作用可以产生高度非韵律性的巨旋回层序,其潮下单元的厚度变化范围很大。

上述任一条件都可以产生显著不同的巨旋回叠加型式,因此可以利用这些可预测的差异来判别旋回叠加的成因机制,从而可以鉴定第三级层序及其在台地上的边界和体系域。

4 非韵律性旋回层序和阿尔卑斯三叠纪碳酸盐逸失的脉动

作者选择安尼期—拉丁期的 Latemar 建造、安尼期 Dolomia Principale 单元、诺利期 Dachstein Kalk (Lofer 相)以及阿尔卑斯利默斯通北部地区进行对比,它们代表了由高频海平面振荡和第三级海平面变化及构造运动所导致的涉及逸失的脉动的一系列问题。

4.1 Latemar 建造中的安尼阶—拉丁阶

与完整的第三级海平面振荡有关的巨旋回层序:安尼晚期—拉丁期的 Latemar 台地层序记录了三套叠加的地层旋回级序,它包括:(1)长期的第三级沉积层序,厚 460m,持续期为 8Ma;(2)第四级巨旋回,厚约数米;(3)第五级旋回,1m 左右。

Latemar 台地包括四个垂直叠加的相序(图 4):(1)下部台地相(LPF),为潮下陆架—泻湖碳酸盐岩,平均每隔 10m 被薄层陆上暴露面中断,米级第五级旋回缺失;(2)下部旋回相(LCF),由米级第五级旋回(73 个旋回,平均 1.24m/旋回)组成,单个旋回由含生物扰动的潮下陆架—泻湖碳酸盐岩上覆薄层渗流白云质钙积层壳组成;(3)暴露相(TF),由米级第五级旋回组成(295 个旋回,平均 0.40m/旋回),它间歇性地被暴露于大气中的帐篷状顶盖中断;(4)上部旋回相(UCF),(由 230 个第五级旋回组成,平均厚 0.96m/旋回),与下部旋回相相

似。

第三级沉积层序由下部台地相、下部旋回相以及暴露相的下半部分构成的垂直相序组成,它是由长期的第三级海平面相对升降旋回形成的。层序顶部则覆盖一层厚度为 13m、被暴露相中断的过渡界面。暴露相上半部分及其上覆的上部旋回相则代表另一套第三级层序的开始(图 4)。

Latemar 层序记录反映出第三级可容空间的递减过程,即长期的第三级海平面变化和台地沉降的总和。它首先表现为下部台地相缺失重复的米级第五级

旋回,而上覆各相中第五级旋回则规则产出,从下而上旋回厚度逐渐减少。由此所标志的非旋回性沉积向旋回性沉积的渐变表明,可供每一次沉积脉动的第三级可容空间在递减。其次,淹没与暴露的比例在层序中自下而上发生规律性变化。下部台地相以富含海相早期同沉积成岩特征的潮下沉积为主,这一特征在上覆各相中缺失,而代之以渗流成岩特征及表生暴露特征的逐渐丰富。所以早期成岩作用的地层变化对应于旋回厚度的变化,二者又同时对应于第三级可容空间的递减。

通过对 Latemar 台地层序的图解时空分析(图 5),重建了第三级可容空间曲线,它示意性地显示了对于平均沉降的长期偏差。这种偏差是由于第五级旋回厚度渐进变化的累积效应引起的。正偏差(向左移动)表示第三级相对海平面上升或沉积积累;负偏差(向右移动)则表示第三级相对海平面下降或沉积物减少。从正到负偏差的旋回不对称曲线说明第一套 Latemar 第三级层序代表第三级可容空间的逐渐减少。

4.1.1 旋回相的意义:韵律巨旋回

Latemar 建造的旋回地层学为三叠纪的韵律沉积提供了基本证据。这些向上变薄的巨旋回叠加型式是对米兰科维奇条带中复合高频海平面变化的韵律性沉积响应。当叠加的第三级海平面变化速率的理论值为零时,计算机模拟的第三级波动在谷区和峰区出现最佳条件。在 Latemar 第三级层序中的下部旋回相和上部旋回相中,上述条件正好适合。图 6 将 Latemar 下部旋回相实际地层与由“沉积先生”模拟产生的地层作了比较。模拟结果出现了完整的五部分韵律巨旋回而不遗漏任何第五级海平面变化的沉积脉动。

4.1.2 下部台地相的意义:混合巨旋回

由米兰科维奇旋回驱动的冰川-海平面振荡在整个沉积过程中都起作用并支配着第五级旋回的发育以及它们在第四级巨旋回中的位置。

下部台地相以淹没条件为主的旋回特征表明每一旋回代表了数个第五级海平面脉动的混合记录,这一海平面在台地顶部以上脉动而不能使台地暴露。在厚度和年龄限定的基础上,该相沉积期间第三级可容空间具有最大值(图 5)。

计算机模拟解释了这一最大可容空间与短期复合海平面变化和恒定的潮下沉积速率相互作用而产生相地层的机制。模拟产生每隔大约 8m 出现的暴露面,混合潮下第五级旋回由

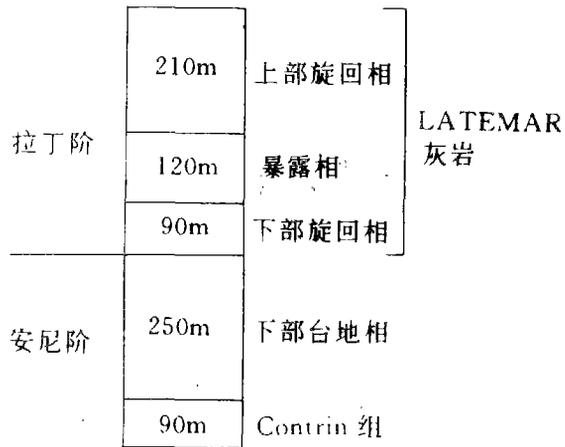


图 4 Latemar 台地地层相柱状图

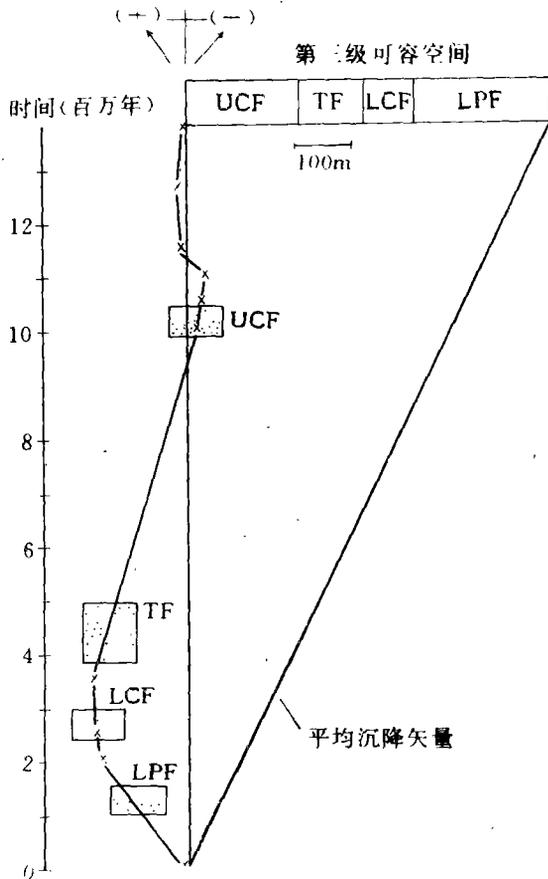


图5 Latemar 台地层序第三级可容空间
纵轴代表地质年代(百万年),每个相的持续期
由计算第五级旋回得到。平均沉降矢量代表台
地背景沉降速率和沉积物形成平均速率。时间
-地层段用阴影小方块表示。由三个不同级次
的海平面振荡叠加产生这些模拟地层段
LPF, 下部台地相; LCF, 下部旋回相;
TF, 暴露相; UCF, 上部旋回相

非对称的第四级巨旋回产生。

按照逸失的脉动解释的下部台地相地层是对 Sander 法则的很好说明。尽管旋回产生的机制具有韵律周期性,但是与之对应的地层记录却没有所有的旋回波动。

4.1.3 暴露相的意义:凝缩巨旋回

该相为一套由相互分离的以帐篷构造为特征的沉积段组成。帐篷构造为同沉积成因,它由挠曲和不连续的第五级 Latemar 旋回组成,最后期膨胀胶结作用的产物。

暴露相中向上渐薄的第四级巨旋回的存在表明,在该相沉积期间,与旋回相相同的复合海平面韵律同样在起作用。尽管具有帐篷顶盖的第四级巨旋回可能包含五个第五级旋回,但是它们都不完整,一般只包含三个或四个第五级旋回。这种不完整的具有暴露相顶盖的巨旋回称为“凝缩的”第四级巨旋回。

从厚度和年龄资料发现,在该相沉积期间,第三级可容空间最小。模拟显示在非对称的第四级海平面振荡下降部分逸失一个或多个第五级脉动而产生凝缩巨旋回的特征。在此期间,早先存在的第五级旋回经历持久的暴露并中断而形成暴露相。

暴露相地层及模拟地层为 Sander 法测提供进一步说明。海平面—台地沉降—沉积历史的研究揭示了发生于第四级振荡下降部分逸失的脉动形成凝缩巨旋回的过程。由于第三级海平面轨迹下降,造成可容空间减小,使淹没与暴露时间的相对比例减少,而且暴露相特征的极薄层旋回不是其它原因而是可容空间减小的结果。

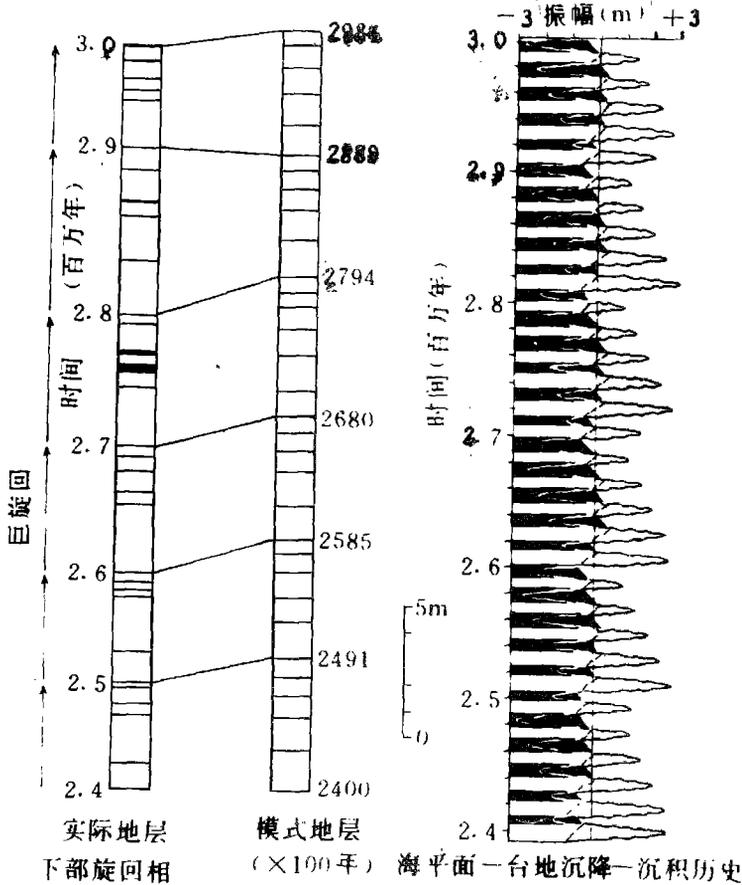


图6 Latemar建造600,000年内下部旋回相地层与模式地层比较

左侧柱状图白色层代表旋回潮下部分,黑色线条代表暴露顶盖。

右图海平面—台地沉降—沉积历史代表图5中下部旋回相(LCF)。

4.1.4 Latemar 巨旋回规则层序的海平面升降模式

计算机模拟定量地说明了复合海平面振荡作用于多样性小比例尺地层和大比例尺垂直地层组合的效应,并且逼真地模拟了实际的 Latemar 地层。

在这些模拟基础上,根据 Sander 法则,总结 Latemar 台地垂直相叠加发育的海平面升降模式如下:

(1)下部台地相——持久的第三级海平面上升占主导,台地保持潮下条件,第三级可容空间达到最大值。随后潮下沉积难以持续,沉积柱体遭受陆上暴露,导致第四级混合巨旋回形成。

(2)下部旋回相——第三级振荡上升速率逐渐减小,导致第三级可容空间减小。在第三级峰区形成发育完整的淹没和暴露大致相等的第四级韵律巨旋回。第三级上升的逐渐减缓导致该相从底部向上依次变薄。

(3)暴露相——第三级海平面下降,第三级可容空间减小,但是沉积作用仍然发生并形成了极薄层旋回,它被划分为含有帐篷状顶盖的第四级凝缩巨旋回,在第四级振荡下降部分,持久的暴露导致暴露相的形成。

(4)上部旋回相——随着第三级海平面下降,暴露相结束,可容空间又增加。在第三级波动的谷区,海平面变化速率为零值左右,因而台地沉降控制了可容空间。它是在与下部旋回相相同的条件下形成的,只不过形成于第三级海平面波动的谷区而不是峰区。该相层序表现为厚的旋回和向上变厚的韵律巨旋回。

总之,第一套 Latemar 第三级层序以一套规则的从混合巨旋回—韵律巨旋回—凝缩巨旋回层序为特征,是三个不同级次的海平面振荡叠加的直接结果。尽管存在时间性的海平面韵律性变化,但是在地层记录的厚度和它所代表的实际时间段之间却存在明显差别。作者进一步提出,浅水台地沉积中,相和旋回厚度并非与旋回持续期直接成正比,而是可容空间的函数。

5 诺利阶旋回台地碳酸盐

诺利阶台地碳酸盐提供了与复合海平面振荡有关的三叠纪米级旋回沉积的又一种型式。本文采用阿尔卑斯南部诺利期 Dolomia Principale 单元作实例。它代表了在极不对称的第三级海平面下降过程的沉积。与此同时,台地沉降从一地到另一地有很大差异,因此,除了普遍的海平面下降以外,与构造运动有关的区域性差异沉降是影响旋回沉积的重要因素。

5.1 诺利阶 Dolomia Principale 单元:第三级海平面下降有关的凝缩巨旋回的规则变化

诺利期 Dolomia Principale 单元主要由两相组成,旋回潮缘相和潮下相(图7),两相均完全白云石化。旋回潮缘相是一套米级旋回的叠加,单个旋回顶部为具有泥裂构造的隐藻层纹岩,而潮下相则由厚度为0.15—5m的成岩旋回组成,每一成岩旋回都包含一个暴露顶盖,它是相对海平面振荡的结果,振荡的平均频率为24,000—40,000年/旋回,因而属于第五级旋回。

潮下单元是一套块状多孔白云岩,顶盖为下列二者之一:(1)由1—3个薄层成岩旋回组成的帐篷构造,厚度为0.25—2m;(2)厚度可变(0.20—1.0m)的红色块状或土状角砾岩。

Dolomia Principale 单元具有帐篷构造顶盖的厚层旋回是产生在非对称的第四级海平面下降部分的凝缩巨旋回,它由向上变薄的旋回组成,在第五级海平面脉动中持续暴露并形成帐篷构造。

由红色土状角砾岩作顶盖的 Dolomia Principale 单元记录了延长的表生暴露和渗流成岩期限,红色表土仅出现于缺失薄层旋回顶盖的潮下单元顶部,它与具有帐篷构造顶盖的凝缩巨旋回之间的差异表现在暴露期间持久的海平面历史的差异,而不是气候条件的差异;而且前者地层凝缩程度更加突出(“超”凝缩巨旋回)。

巨旋回型式的变化是与长期的相对海平面第三级变化有关的巨旋回多样化的规则序列,特别是与第三级可容空间的缓慢减小过程有关。它使得单个第四级巨旋回中第五级脉动的逸失更加频繁,因而地层更加凝缩。由此可知,运用 Sander 法则解释旋回叠加型式,是联系不同级序旋回层序的关键因素。

5.2 Dachsteinkalk 的 Lofer 相:受构造脉动影响的复杂旋回地层

作者对利默斯通北部地区诺利期 Lofer 相的考查集中于以下方面:(1)由假整合面限定的旋回内岩石组份的叠加型式;(2)巨旋回及其地层配置;(3)形成 Lofer 旋回的可能机制。

Lofer 旋回可划分为四个亚相;(1)亚相 C,为厚度介于1—26m的具有海底硬底的粒泥灰岩和颗粒灰岩组成;(2)亚相 B2,白云质含潜穴构造的豆粒泥灰岩和泥粒灰岩;(3)亚相

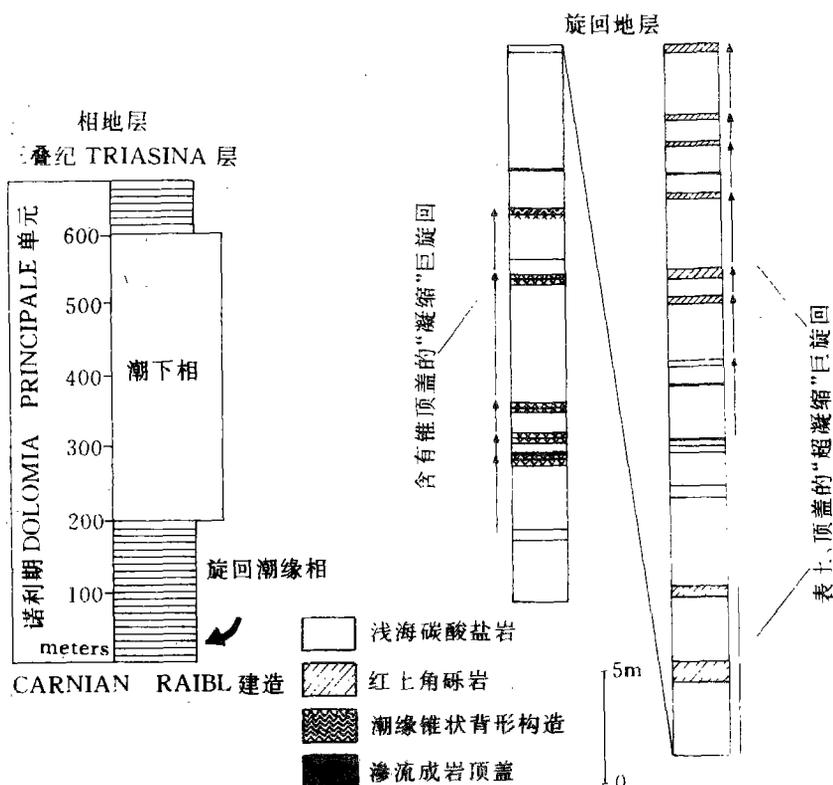


图7 阿尔卑斯南部多勒米茨地第诺利阶 Dolomia Principale 单元相地层(左图)和旋回地层(右图)

B1,白云质层纹层;(4)亚相 A,包含其它亚相碎屑的层内砾岩。

与 Latemar 台地或 Dolomia Principale 单元旋回相比,Lofer 旋回厚度变化范围很大,层序中随机地出现 10m 级规模的潮下层,也有一些厘米级单元(主要是 C-B1 和 C-B2 亚相层偶),这与 Latemar 台地旋回的规则叠加完全不同。在 Lofer 旋回中,表土层散布于整个层序中,没有发现旋回厚度规则分布的趋势,表土角砾岩只见于旋回厚度大于平均厚度的旋回顶部,表明“超厚旋回”的形成与持续的暴露有关。

旋回厚度韵律的缺失、超厚旋回的不规则分布以及暴露的频繁和不规则性表明,除了韵律性复合海平面变化之外,其它因素对旋回沉积作用具有重要影响。作者认为,Lofer 相在很大程度上受台地沉降速率短期变化的控制,从而导致旋回厚度和成岩特征在地层中紊乱分布,缺失米兰科维奇韵律性成因的巨旋回型式,在更大范围内,没有受第三级海平面变化控制的地层型式。

6 讨论

6.1 Latemar 建造旋回叠加型式的计算机模拟

计算机可以用来对 Latemar 台地混合巨旋回—韵律巨旋回—凝缩巨旋回—韵律巨旋回的规则层序进行模拟。模拟中,在沉积速率和台地长期沉降速率恒定的条件下,在第三级海平面波动之上叠加第四级和第五级复合海平面振荡。模拟结果见图 8。模拟说明,高频旋回(第四级和第五级)在整个第三级层序中规则地改变它的叠加型式(厚度、亚相特征、早期成

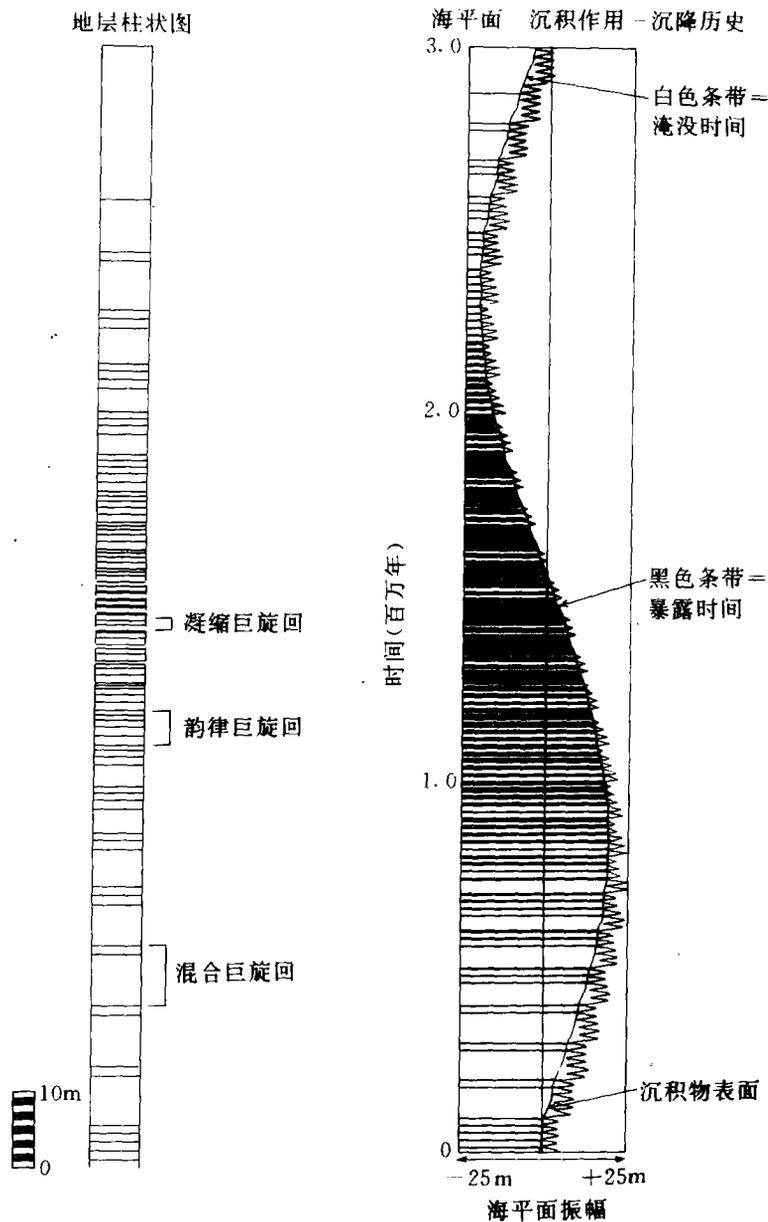


图8 利用“沉积先生”计算机程序模拟的

碳酸盐台地淹没-暴露记录。由此所产生的旋回地层如左侧柱状图所示

岩特征),这是由于在第三级海平面变化期间可容空间的规则变化造成的。当第三级海平面上升时,随着水深增大,导致具有厚层潮下单元的混合巨旋回产生;当第三级海平面下降时,水体深度减少,产生含有表土或帐篷构造顶盖的凝缩巨旋回;而在第三级海平面上升和下降的转折部位则产生具有五部分组成的韵律巨旋回。模拟结果与对 Latemar 台地的观察结果十分相似。

6.2 地层力等级

显而易见,不同等级的海平面相对波动都有其特征的振荡频率和振幅,这是由于它们不

同的驱动机制造成的,即由地层力等级决定了海平面振荡等级。这一地层力的产生不外乎以下两种机制:即冰川-海平面变化(盆地中总量的变化)和构造-海平面变化(盆地形态和体积的变化)。前者主要控制第四级和第五级海平面变化,后者则主要控制第三级海平面变化。而且这一等级序列中,低频海平面旋回驱动高频海平面旋回,从而产生高频旋回地层叠加过程中规则的内部建造。

以拉丁期 Latemar 建造旋回地层为例,地层力等级的第三级变化控制了第四级巨旋回形成时混合巨旋回—韵律巨旋回—凝缩巨旋回—韵律巨旋回的规则序列。随着台地缓慢的构造沉降和与之伴随的第三级海平面振荡,地层力在平均可容空间里发生长期的规则变化。同样,第四级巨旋回内第五级旋回规则的向上变薄也是地层力等级作用的结果。第四级海平面振荡规则地改变第五级可容空间,并形成了向上变薄的旋回。

6.3 Latemar 建造层序地层和体系域发育:旋回地层、相地层和层序地层之关系

沉积层序是由区域间不整合面或与其相关的整合面所控制的具有成因联系的一套整合地层序列。层序可以被进一步划分为由同时的沉积体系(陆架、斜坡、盆地)联合构成的体系域组份,它是相的三维组合。体系域是根据它在层序内的位置、界面类型(I类或II类界面、最大海泛面等等)以及高频旋回叠加型式来定义的。由于高频旋回可以确定长期的可容空间的变化,所以可以应用第三级层序高频旋回叠加型式定义层序体系域。这在无法获取地震资料及其他方法无效的地区显得尤其必要。

应用计算机模拟的 Latemar 旋回地层(图8)对此可作充分说明。如图9所示,模拟开始于碳酸盐台地发生海侵时,由第三级海平面上升产生的海进体系域一系列加积的混合巨旋回为特征。海进体系域之上的最大海泛面与可容空间增大的最大速率线一致。在最大海泛面之上,高水位体系域以韵律巨旋回(高水位早期体系域)为特征,反映第三级海平面波动达到峰区时上升速率的减小,其后则为与第三级海平面下降相对应的凝缩巨旋回(高水位晚期体系域)。总体上,由于第三级可容空间的逐渐减小,第四级巨旋回从最大海泛面向层序顶部逐渐变薄。上部的层序界面出现于最薄的凝缩巨旋回段之内,并且与可容空间减小的最小速率线一致。而层序界面之上的另一套层序的海进体系域由一系列向上变厚的第四级巨旋回组成,从凝缩层—韵律层—混合层。因而这一层序界面是过渡性的。

这类过渡的而不是假整合面型的层序界面实际的 Latemar 层序中也已经发现,它在地震剖面中无法鉴别。因此,除了由于与不整合面有关而被直接识别的I类和II类层序之外,由整合面界定的层序和由淹没-不整合面界定的层序也会存在。对层序概念的这种补充超出了从地震地层中建立的原始定义。只要层序在成因上与第三级海平面变化有关,那么这一补充对于重建海平面变化历史是绝对必要的。

上述设想是解释安尼期—拉丁期 Latemar 台地碳酸盐层序的基本要素。在 Latemar 建造第一套层序内,底部被一不整合面中断,其下部则为安尼期 Contrin 组中段顶界,以一套斜坡相的滑塌碳酸盐岩屑和巨砾为特征,可能代表了低水位期体系域。而海进体系域则以下部台地相为代表,它的形成对应于第三级可容空间增加,是第三级海平面上升的结果。从海进体系域向高水位体系域的转变以台地内部旋回和巨旋回叠加型式可识别的变化为标志。很显然,下部台地相的第四级混合巨旋回向上过渡为下部旋回相的第四级韵律巨旋回。而真正的高水位体系域被划分为高水位早期相(下部旋回相)和高水位晚期相(暴露相下半部分)。它们是在以第三级海平面下降为主的第三级可容空间的逐渐减小条件下发育的。第二套拉丁

期层序的海进体系域以暴露相上半部分的第四级凝缩巨旋回和上部旋回相的韵律巨旋回为代表。在这两套第三级层序之间缺乏可识别的不整合层序界面。事实上,暴露相下部与上部之间呈过渡变化,这一界面是由无数紧密叠加的不整合面组成的整合界面,它被解释为第三级可容空间从持续减小到持续增加(图5)过程的产物。

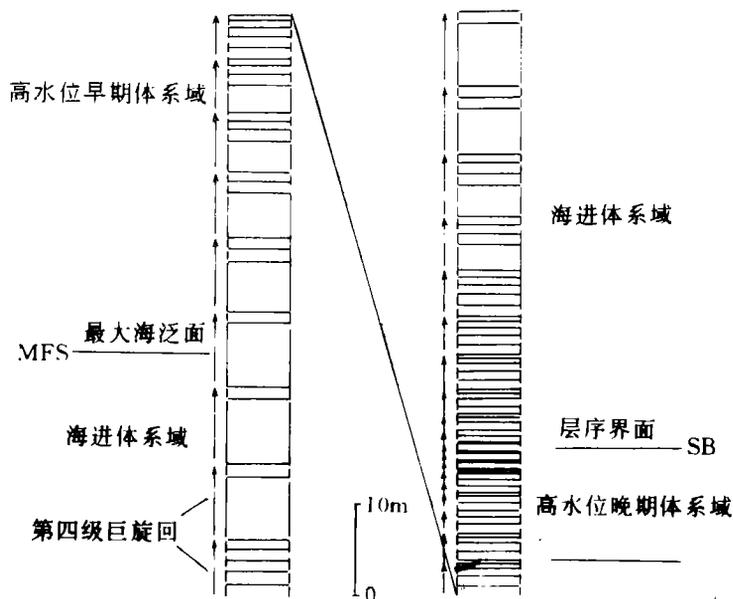


图9 按层序地层观点对旋回和巨旋回叠加型式规则序列的解释。
巨旋回界面与图7一致,模拟产生的地层进一步划分为体系域

Latemar 台地提了一个典型实例,层序地层与相地层和旋回地层呈过渡关系。联系小旋回和大旋回的关键步骤是对高频旋回叠加型式的理解和识别,即对逸失的脉动的地层进行研究。

6.4 结论

Latemar 台地拉丁期建造记录了控制阿尔卑斯三叠纪碳酸盐台地沉积作用的机制。根据这一旋回地层可得出如下结论。

1. 复合海平面变化(第三级、第四级、第五级的叠加)是阿尔卑斯三叠纪台地碳酸盐旋回地层和相地层的主要控制因素。

2. 第五级沉积旋回短期的叠加型式受第四海海平面变化控制,从而产生与米兰科维奇天文韵律一致的韵律性沉积记录。

3. 高频沉积旋回(第四级和第五级)叠加型式中的规则变化受低频(第三级)海平面变化控制,而这些长期性的规则变化不受高频旋回的自生性或他生性控制。

4. 受复合海平面变化驱动的地层力等级控制着沉积旋回的地层叠加型式和浅水碳酸盐的早期成岩作用。

5. 沉积于平缓台地和海滩上的浅海碳酸盐第三级层序可能具有过渡性界面而不是不整合界面,因而在地震剖面图上无法识别。此时,高频旋回的叠加型式是鉴定层序的唯一手段。

编译自 Geological Society of American Bulletin V. 102, pp. 535—562 May 1990, "Depositional cycles, composite sea-level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: Examples from Alpine Triassic platform carbonates" R. K. Goldhammer P. A. Dunn L. A. Hardie