

# 碳酸盐岩层序形成的计算机模拟<sup>①</sup>

于炳松

(中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室, 贵阳 550002)

**提 要** 本文运用一个作用—响应模式, 模拟了在各种不同的海平面变化和基底沉降速率条件下, 在碳酸盐台地上不同部位的沉积作用响应, 从而对影响碳酸盐岩层序形成的各要素之间的相互作用作出了定量解释。通过模拟可知, 在基底沉降速率一定的前提下, 碳酸盐岩层序的形成受控于海平面的变化, 且碳酸盐岩层序的形成对于海平面变化响应的敏感性随着水深的增加而降低; 一个完整的三级海平面变化旋回在地质记录中的反映, 由于其所处的沉积背景不同而呈现出明显的差异; 三级海平面变化幅度对碳酸盐岩层序的形成也有明显的控制作用。形成近对称三级旋回层序的先决条件是基底沉降速率必须很低, 因此, 近对称三级层序可认为是稳定克拉通背景的一个鉴别标志。

**关键词** 层序 海平面变化 计算机模拟

**第一作者简介** 于炳松 男 34 岁 博士后 沉积学、层序地层学和沉积矿床学

众所周知, 计算机技术引入地质学, 是将地质学从传统的定性描述推向定量解释和预测的一次革命。在沉积学中, 计算机模拟技术, 有可能帮助我们解决长期存在的地质难题。计算机模拟模式可以证实沉积层序成因机制中各要素之间的相互作用; 可以验证并提高地质数据采集和解释的精确性和准确性, 促进地质资料的多学科综合研究和独立解释; 可以发现新的问题和指出新的研究领域, 并可对沉积层序进行预测。目前, 在沉积学中, 计算机模式主要有正演模式 (forward models) 即作用—响应 (process—response) 模式, 反演模式 (inverse models) 即从岩石记录—作用 (rock to process) 模式, 沉积作用模拟模式, 地层单元模拟模式和沉积几何体模拟模式。

## 1 碳酸盐岩层序形成的模拟模式

为了更好地理解碳酸盐岩层序的形成机制, 定量地了解影响层序形成的各因素之间的相互关系, 我们运用了一个作用—响应模式<sup>(1,2)</sup>, 来模拟碳酸盐岩层序的垂向叠置方式和横向展布特点。其基本思路是建立在层序地层学的基本观点上, 即地层单元的几何形态和岩性受四大参数控制。这四大参数是构造沉降、海平面升降、沉积物供给和气候条件。其中沉降速率、海平面升降速率和盆地沉积物供给速率 (产率) 这三个参数控制了沉积盆地的几何形态。沉降速率和海平面变化速率这两个参数综合起来可作为沉积物可容纳空间系数。上述参数之间的关系可通过一个简单的方程来表示:

① 中国科学院现代古生物学和地层学开放研究室实验室基金资助项目 (名称: 贵州三叠纪海平面变化与高分辨率层序年代地层体制的建立及模拟 编号: 9524)

收稿日期: 1996—01—26

$$\Delta IS + \Delta SL - \Delta DS = \Delta DW \quad (1)$$

式中  $\Delta IS$  代表基底沉降,  $\Delta SL$  代表海平面升降,  $\Delta DS$  代表沉积物厚度,  $\Delta DW$  代表水深的变化。从 (1) 式可知, 相对海平面变化 ( $\Delta IS + \Delta SL$ ) 减去沉积的厚度 ( $\Delta DS$ ) 等于从属变量水体深度的变化 ( $\Delta DW$ )。通过对时间求导数, 则 (1) 式可写成如下形式:

$$\frac{dIS}{dt} + \frac{dSL}{dt} - \frac{dDS}{dt} = \frac{dDW}{dt} \quad (2)$$

这个非常简单的方程使得在沉积学和地层学中控制沉积作用的变量之间建立起一个数学关系。在这里, 沉积物的内压实作用未予考虑。

方程的基本含意是: 任一变量的变化可归因于任一种其它变量的联合变化。更确切地说, 海进、海退和不整合接触的沉积层序的发育可能反映了  $\Delta IS$ 、 $\Delta SL$  和  $\Delta DS$  的任意一种联合作用。

对于碳酸盐岩而言, 其沉积物产率主要受水深所控制, 即碳酸盐产率可粗略地看成是水深的函数 [ $DS=f(DW)$ ], 则 (2) 式可改写成:

$$\frac{dIS}{dt} + \frac{dSL}{dt} - \frac{df(DW)}{dt} = \frac{dDW}{dt} \quad (3)$$

从 (3) 式中可以清楚地看出, 碳酸盐岩层序的形成, 主要受海平面变化速率和基底沉降速率所控制, 据此, 我们可以构筑一个理论模式即作用模式, 通过输入不同的原始参数, 来模拟在各种不同的海平面变化和基底沉降速率的条件下, 碳酸盐台地上不同部位的沉积作用响应, 从而达到对影响碳酸盐岩层序形成的各要素之间的相互作用作出定量和合理解释的目的。模拟结果输出为海平面变化曲线, 沉积物表面高程曲线、沉积物柱状图和相对水深变化曲线。

## 2 初始参数及其确定

### 2.1 程序运行时间 (NY)

表示模拟过程总的时间长度, 以千年 (Ka) 为单位。因本次模拟均为一个三级海平面变化周期, 故取运行时间为 1000 Ka。

### 2.2 初始水深 (IDW)

表示程序运行开始时的初始水深, 以米 (m) 为单位。不同的初始水深, 代表模拟浅水碳酸盐台地上不同部位的沉积作用状况。

### 2.3 海平面变化曲线 (SL)

在碳酸盐岩层序中, 常具有明显的韵律性, 且其组合存在内在的规律性。这就告诉我们, 必然存在着一种具韵律性的驱动机制控制着碳酸盐岩的沉积。对此, 国内外学者普遍认为海平面变化旋回是控制碳酸盐岩高频旋回的主要因素。海平面变化的这种韵律性旋回, 被归因于 Milankovitch 旋回作用所致<sup>[3,4,5,6]</sup>。Olsen 等<sup>[7]</sup>指出, 这种旋回周期在地层中的出现, 至少可追溯到中生代和晚古生代。而 Koerschner 和 Read<sup>[6]</sup>的研究证明, 它们也控制着寒武纪的旋回沉积, 说明地质历史中这种旋回作用的普遍性。过去 140 Ka 以来的更新世海

平面变化曲线<sup>[4]</sup>告诉我们, 100 Ka 周期的较高级别的海平面振荡含有 5 个较低级别的 20 Ka 周期的波动叠加其上, 而且, 海平面的变化具有明显的不对称性, 其最高水位大约在 125 Ka 以前, 紧接着是叠加有较低级别周期波动的缓慢下降, 降到最低水位大约在 18 Ka 以前。基于上述讨论, 本次模拟模式中的海平面变化曲线, 由三级海平面变化曲线 (周期为 1—3 Ma), 加上周期为 100 Ka 的四级不对称曲线和周期为 40 Ka、20 Ka 的五级高频正弦曲线合成。其中 100 Ka 周期的不对称曲线中, 上升部分占周期的 10%—20%, 下降部分占 80%—90%。

#### 2.4 基底沉降速率 (IS)

通常认为, 沉积物的沉积空间主要是由基底的沉降所造成的。在沉积盆地的不同部位, 基底的沉积速率不同, 但在稳定的碳酸盐台地背景上, 可粗略地认为沉降作用是均一的。此外, 在盆地发育的不同阶段, 基底的沉降速率也有变化, 但相对于被动大陆边缘延续的时间 (约 150 Ma) 来说, 在较短的时间间隔内 (1—3 Ma), 可认为沉降速率是均一的<sup>[6]</sup>。这次模拟的基底沉降速率从 0.01—0.05 m/Ka。

#### 2.5 取决于水深的沉积作用速率 (DSP)

碳酸盐岩沉积物基本上是原地生成的。碳酸盐物质大部分是由生物生成的。许多是作为光合作用的副产品而形成的<sup>[6]</sup>。因此, 碳酸盐产物的形成作用在很大程度上取决于光的作用, 并随着水深的增加而税减。碳酸盐物质产生的有利深度范围被限制在水体上部的 50—100 m 以内, 因此带能维持光合作用的有机物质的有效生长<sup>[8]</sup>。更有意义的是, 在水深 10 m 以内, 碳酸盐产率最高, 在 10—20 m 深度内, 产率税减<sup>[8]</sup>。本次模拟的碳酸盐产率数值, 主要根据现代碳酸盐产率数值类比。不同深度的碳酸盐产率见表 1。

### 3 模拟结果及其地质意义

本文首先在保持海平面变化曲线和碳酸盐产率不变的前提下, 模拟不同基底沉降速率条件下, 浅水碳酸盐台地上不同部位的层序发育特点。初始参数见表 1、表 2。模拟结果见图 1。然后, 在基底沉降速率和碳酸盐产率保持不变的前提下, 模拟不同三级海平面变化幅度对浅水碳酸盐台地上不同部位层序形成的影响。基底沉降速率取 0.02 m/Ka。三级海平面变化幅度从 10—50 m。其余参数不变。模拟结果见图 2。

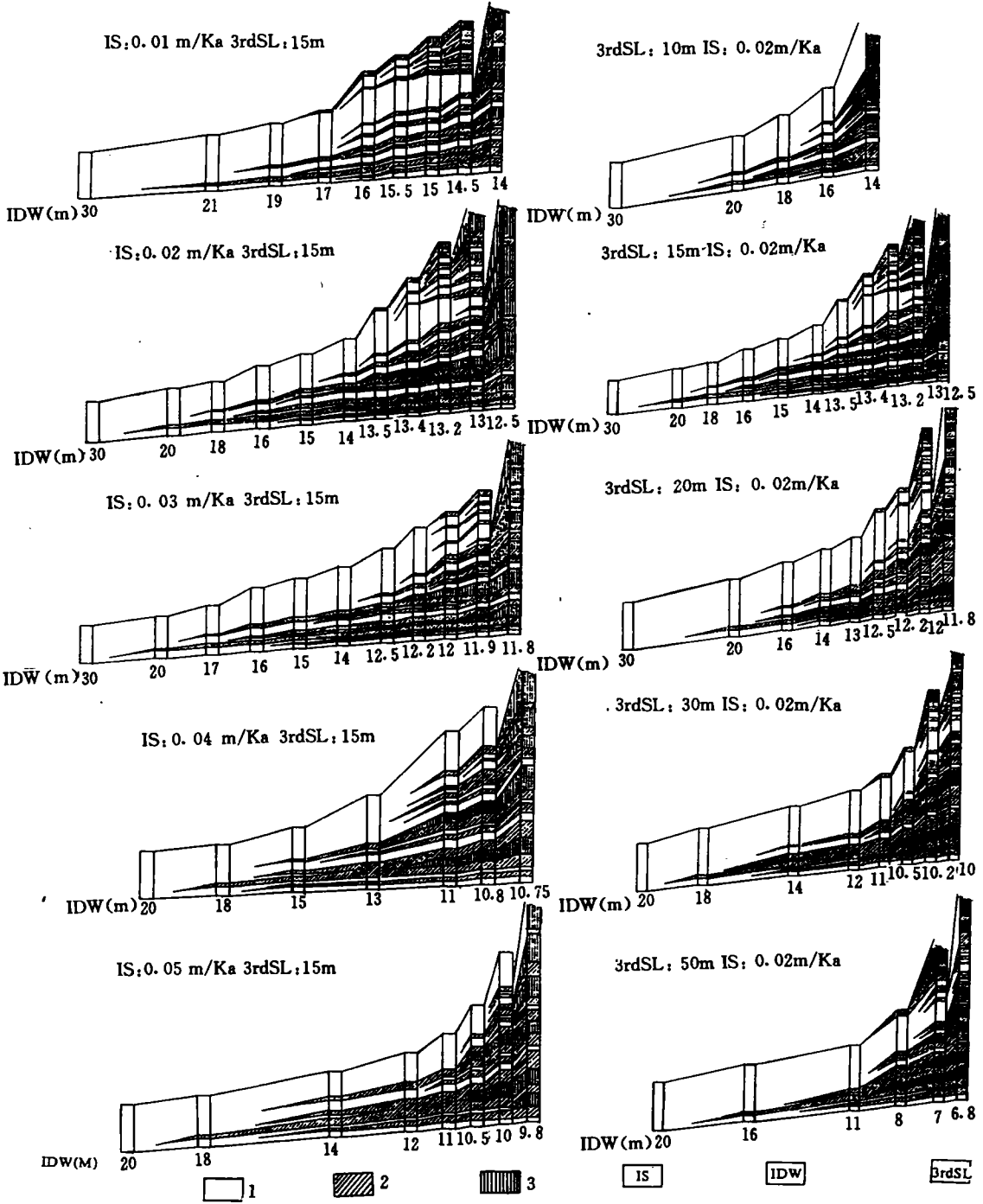
表 1 不同水深碳酸盐产率表

Table 1 Carbonate productivity versus water depth

深度 (m)	0—2	2—5	5—10	10—20	20—100	100 以下
产率 (m/Ka)	0.4	0.5	0.4	0.1	0.01	0.005

通过对上述模拟结果的分析, 可得到以下几点认识。并以塔里木盆地北部下古生界碳酸盐岩层序为例来说明在具体分析中的应用。

(1) 在基底沉降速率一定的前提下, 碳酸盐岩层序的形成主要受控于海平面的变化。海平面变化的旋回周期决定了碳酸盐岩层序的级次。



1. 水深 > 20 m 形成的岩相 2. 水深 10—20 m 形成的岩相 3. 水深 < 10 m 形成的岩相

IS. 基底沉降速率 IDW. 初始水深 3rdsL. 三级海平面变化幅度 (图 1、图 2 图例相同)

图 1 基底沉降速率与碳酸盐岩层序关系的模拟结果

图 2 三级海平面变化幅度与碳酸盐岩层序关系的模拟结果

Fig. 1 Simulating results of carbonate sequences versus the subsidence rate of basement

Fig. 2 Simulating results of carbonate sequences versus the 3rd-order sealevel change amplitude

(2) 碳酸盐岩层序的形成对于海平面变化响应的敏感性随着水深的增加而降低。在较深水处, 由于较低级别的微小海平面变化对碳酸盐产生的影响不大。故只能显示出与较高级别的海平面变化相对应的碳酸盐岩层序。随着水深的逐渐变浅, 碳酸盐的产生对于海平面变化响应的敏感性逐渐增加, 较低级别的碳酸盐岩旋回层序也日趋明显。如图

表 2 海平面变化曲线参数表

Table 2 Parameters of sea-level change curves

级次	周期 (Ka)	幅度 (m)	对称性
三级	1000	15	对称
四级	100	15	上升占 15%, 下降占 85%
五级	40	6	对称
	20	4	对称

1 所示, 模拟较深水条件时, 在一个三级海平面变化旋回中, 只能识别出四级旋回层序, 随着水深逐渐变浅, 所能识别出的四级旋回层序的数量逐渐增加, 且四级旋回中的五级旋回也日趋明显。认识到这一点, 对于我们正确理解碳酸盐岩层序的成因机制具有指导意义。在碳酸盐岩中, 国内外许多学者早已识别出了大量的向上变浅的高频米级旋回。经过测算, 这些米级旋回的周期在 20 Ka 左右<sup>[4,5]</sup>。从岩相特征来看, 这些米级旋回均发育在潮缘浅水区。它们应与较低级别的五级海平面变化相对应。但是, 在地质历史上的碳酸盐岩中, 还存在着另一种向上变浅的米级旋回, 从岩相特征来看, 它们形成于较深水的背景上。塔里木盆地北部奥陶系萨尔干组中, 发育有一种由黑色钙质页岩与深灰色微晶灰岩构成的向上变浅的厚度在 0.8—1.2 m 的米级旋回<sup>①</sup>。钙质页岩中含黄铁矿结核和丰富的笔石化石, 说明形成时的水体较深。从计算机模拟结果来看, 这些米级旋回可能反映更高的级序。据剖面资料测算, 证明这种米级旋回的周期约为 100—500 Ka, 相当于四级旋回, 不能与潮缘浅水区的那些米级旋回进行简单的对比。这为我们建立正确的层序格架提供了理论指导。

(3) 一个完整的三级海平面变化旋回(从上升到下降)在地质记录中的反映, 由于其所处的沉积背景不同而呈现明显的差异。在深水区, 由于碳酸盐产率低, 常表现为相对水深的不断增加。在浅水处, 由于碳酸盐产率高, 无论是三级海平面上升时期还是下降时期, 均显示出相对水深逐渐下降的海退过程。只有在中间适当的部位, 才能识别出相对水深由上升到下降的一个完整旋回(图 1)。由此可见, 相对水深变化与海平面变化之间, 虽存在着内在的联系, 但单凭相对水深变化情况是难以对海平面变化作出正确估算的, 必须同时考虑沉积物产率和基底沉降的性质和特点。据此, 我们可以得到这样的观点, 要想在全盆甚至全球范围内根据露头 and 钻井剖面进行相对海平面变化的对比, 所测剖面或所获资料的沉积背景, 必须处在上述的适当部位, 即在地层记录中能识别出与海平面变化相对应的变化的区域背景上。否则, 对比将成为不可能。塔里木盆地北部肖尔布拉克地区寒武纪相对海平面变化曲线显示, 早期有一快速上升, 其后为持续下降过程, 这与地震剖面中上超点变化曲线所反映的相对海平面变化曲线不相吻合<sup>[9]</sup>。从该区寒武系的沉积特征来看, 它主要由白云岩、砂屑白云岩、藻粘白云岩和藻叠层白云岩组成。说明其形成时水体较浅, 位于潮缘地区。这种沉积背景上, 由于碳酸盐产率高, 从而导致了海平面上升时期相对水深的持续下降。模拟结果很好地解释了二者之间差异的原因。

(4) 在基底沉降速率一定且较低的前提下, 三级海平面变化幅度对碳酸盐岩层序的形

① 于炳松. 新疆塔里木盆地北部古生代层序地层及其沉积学研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 1994.

成也有明显的影响(图2)。在三级海平面变化幅度很低时(10 m),形成的三级层序不明显。随着三级海平面变化幅度的增加,三级层序也日趋明显,且近对称的三级层序的位置也向浅水方向迁移。在三级海平面变化幅度很大时(50 m),三级层序中显示低级别旋回层序(四级、五级)的能力明显下降。因此,发育极好的高频四级、五级旋回层序的碳酸盐地层,可认为是在中等到低三级海平面变化幅度条件下形成的(10—30 m)。随着基底沉降速率的增加,显示同样级别旋回层序特征的三级海平面变化幅度将相应减小(图2)。

(5) 形成近对称三级层序的先决条件是基底沉降速率必须很低(小于0.03 m/Ka)。且这类层序发育的沉积背景,随着基底沉降速率的增加而逐渐向浅水方向推进。当沉降速率较大时(大于0.04 m/Ka),将不能形成近对称的碳酸盐岩层序(图1)。剖面中的相对水深,即使在海平面下降时也将持续增加。这很好解释了柯坪大湾沟剖面中相对于475 Ma时的那一次大规模海平面下降没有明显反映,而总体仍表现为相对水深持续增加的原因是基底的快速沉降<sup>[10]</sup>。从这里,我们可认识到,近对称三级碳酸盐岩层序,可认为是稳定克拉通沉积背景的一种标志。

(6) 由较浅水相岩石—深水相(大于100 m)—较浅水相岩石组成的近对称的三级碳酸盐岩层序,其形成时除了基底沉降速率很低外,三级海平面变化幅度必须很大。若基底沉降速率大,则不能形成近对称的三级层序。若三级海平面变化幅度很小,则由于小规模的海平面变化对深水处的沉积作用影响不大,也难以形成明显的三级层序(图3)。

综上所述,碳酸盐岩层序的发育是上述诸因素联合作用的结果。在不同地区,不同沉积背景上,由于各种因素的性状不同,则由它们综合作用所控制的碳酸盐岩层序,也必然显出不同的发育特征。因此,在进行具体的层序分析时,必须注意区分主要矛盾和次要矛盾,透过现象去探索碳酸盐岩层序形成的规律性。

致谢:本文在写作过程中,得到导师乐昌硕教授、蔡克勤教授的精心指导,谨此致谢!

#### 参 考 文 献

- [1] Demicco R V and Spencer R J. MAPS—a BASIC program to model accumulation of platform sediments. *Computer and Geosciences*, 1989, 15 (1): 95—105.
- [2] Spencer R J and Demicco R V. Computer models of carbonate platform cycles driven by subsidence and eustasy. *Geology*, 1989, 17: 165—168.
- [3] Hays J D, Imbrie J and Shackleton N J. Variation in the earth's orbit: pacemaker of the ice ages. *Science*, 1976, 194: 1121.
- [4] Goldhammer R K, Dunn P A and Hardie L A. High frequency glacio—eustatic sea level oscillation with Milankovitch characteristics recorded in Middle Triassic plat form carbonates in N. Italy. *Am. Jour. Science*, 1987, 287: 853—892.
- [5] Goldhammer R K, Dunn P A and Hardie L A. Depositional cycles, composite sea level changes, cycle stacking patterns, and the hierarchy of stratigraphic forcing: examples from Alpina Triassic Platform carbonates. *Geological Society of America Bulletin*, 1990, 102: 535.
- [6] Koerschner III, W F and Read J F. Field and modelling studies of Cambrian carbonate cycles, Virginia Appalachians. *J. Sediment. Petrol.*, 1989, 59 (3): 654—687.
- [7] Olsen P E. A 40—million—year lake record of Early Mesozoic orbital climatic forcing. *Science*, 1986, 234: 842—848.
- [8] Schlager W. The paradox of drowned reefs and carbonate platform. *Geo. Soc. Am. Bull.*, 1981, 92: 197—211.
- [9] 于炳松. 塔里木盆地北部寒武纪海平面变化研究. *沉积学报*, 1996, 14 (1): 33—39.
- [10] 于炳松. 塔里木盆地北部中下奥陶统碳酸盐岩陆棚——盆地的层序地层分析. *矿物岩石*, 1995, 15 (3): 44—49.

## Computer Simulation of Carbonate Sequences

*Yu Bingsong*

(Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

### Abstract

The formation of carbonate sequences is mainly controlled by the sea level change and subsidence of basement. Accordingly, we can construct a theoretical model (process model) to simulate the response of sedimentation at different sites on a shallow carbonate platform under the conditions of different sea-level changes and different subsidence rates of basement, so that we can understand the interaction among the factors affecting the formation of carbonate sequences. We can get some important conclusions from simulations. Under the premise of the definite subsidence rate of basement, the formation of carbonate sequences is controlled by sea-level change, and the sensitivity of its response to sea-level change decreases with water depth, so the meter-scale carbonate cycles forming on the different settings can not be compared with each other simply. The reflection of a third-order sea-level change cycle in geologic record is quite different on different depositional settings. Under the deep water, the relative water depth will show continuously falling, and under the shallow water, rising. So, if we want to construct a relative sea-level change curve about the whole basin or the globe depending on outcrop or boring sections, we have to select proper sections where the relative sea-level change can be recognized from the geologic record, otherwise the comparison of relative sea-level changes will be impossible. The amplitude of the third-order sea-level change also affects the sequence, and the carbonate strata with high-frequent forth or fifth-order cycles certainly develop under the conditions of middle to low amplitude of the third-order sea-level change. If the third-order sequence is nearly symmetric, it is certain that the subsidence rate is very low, so the nearly symmetric third-order sequence is a token of a craton basin.

**Key words:** carbonate sequence sea level change computer simulation