碳酸盐岩地层完整性分析及其影响因素定量评价: 来自地层正演模拟的启示

刘建良^{1,2}, 刘可禹^{1,2,3*}

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580;

2. 中国石油大学(华东)深层油气重点实验室, 青岛 266580;

3. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

* 通讯作者, E-mail: liukeyu@upc.edu.cn

收稿日期: 2020-04-03; 收修改稿日期: 2020-06-27; 接受日期: 2020-07-09; 网络版发表日期: 2020-09-08

国家重点研发计划项目(编号: 2019YFC0605501)、中国科学院战略性先导科技专项A类项目(编号: XDA14010401)、国家自然科学基金项目(批准号: 41821002)和山东省自然科学基金项目(编号: ZR2018BD018)资助

摘要 自然界中大部分沉积地层均存在不同程度的沉积间断, 但目前缺乏用于定量识别和刻画不同级别(时间跨度)沉积间断面及间断时间和定量评价地层完整性的有效方法. 文章提出一种基于沉积过程的地层正演数值模拟方法, 可用于定量评价沉积盆地碳酸盐岩地层完整性及其影响因素. 通过在地层正演数值模拟结果中同时提取沉积盆地中不同位置(不同沉积环境)虚拟井的时间域和深度域信息, 建立时空演化剖面, 定量分析碳酸盐台地边缘亚相、斜坡相和盆地相的地层沉积、剥蚀及滑塌重力流沉积演化全过程, 刻画沉积间断面及间断时间, 进而计算地层完整性. 地层正演数值模拟敏感性分析表明, 碳酸盐岩地层完整性主要受沉积环境、海平面升降幅度、碳酸盐岩生长速率和构造沉降样式的影响, 且诸因素影响方式和作用结果各异.

关键词 地层完整性, 时间域和深度域, 沉积演化, 控制因素, 碳酸盐岩沉积, 地层正演模拟

1 引言

18世纪80年代英国著名地质学家赫顿首次在地层记录中认识到沉积地层存在不完整性(Hutton, 1788), 随后的200多年里许多地质学家针对地层不完整性开展了各方面研究(如Barrell, 1917; Miller, 1965; Ager, 1973; Sadler, 1981; Burgess和Wright, 2003; Kemp, 2011; Straub和Foreman, 2018). 人们已广泛认识到大部分地层存在沉积间断, 只是沉积间断级别和间断时

间跨度各异(Tipper, 1983; Straub和Foreman, 2018). Sadler和Strauss(1990)将地层完整性定义为: 在特定时间范围 t 内, 存在沉积记录的时间与总时间 t 的比值. 地层完整性必需以给定的时间尺度(时间步长)为前提评价才有意义(Sadler, 1981), 对于同一套地层, 当选择的时间步长不同时, 地层完整性评价结果也存在差异(Sadler, 1981; Sadler和Strauss, 1990; Kemp, 2011). 前人研究表明, 浅水碳酸盐岩沉积地层完整性普遍较低, 如在第四纪“冰室(Icehouse)”气候背景下, 由于海平面

中文引用格式: 刘建良, 刘可禹. 2021. 碳酸盐岩地层完整性分析及其影响因素定量评价: 来自地层正演模拟的启示. 中国科学: 地球科学, 51(1): 150–158, doi: 10.1360/N072020-0100

英文引用格式: Liu J, Liu K. 2020. Estimating stratal completeness of carbonate deposition via process-based stratigraphic forward modeling. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-020-9660-8>

频繁且高幅度震荡, 沉积地层只能记录约10~20%的沉积时间(Algeo和Wilkinson, 1988; Sadler, 1994), 即使在“温室(Greenhouse)”高频海平面震荡幅度相对较小的气候背景下, 浅水碳酸盐岩的地层完整性也一般<50% (Sadler, 1994).

识别地层沉积间断面并定量评价地层完整性具有重要地质意义: (1) 重建更为精确的古环境、古生物和古气候演化过程(Sattler等, 2005; Rameil等, 2012; Straub和Foreman, 2018); (2) 揭示天文旋回控制下的海平面变化对沉积地层高频旋回的影响及其沉积响应(Allan和Matthews, 1982; Elrick和Scott, 2010); (3) 从时间域角度更为直观、准确地探讨地层构造-沉积演化过程(Durkin等, 2018); (4) 定量确定沉积间断面对同生期碳酸盐岩储层物性的影响(杨磊磊等, 2020). 然而, 定量获取一套地层的沉积记录时间及其沉积间断次数和间断时间目前仍极具挑战性(Sadler, 1981; Burgess和Wright, 2003; Straub和Foreman, 2018). Sadler(1981)收集并分析了约25000个不同沉积环境、不同时间步长的地层沉积速率数据并建立图版, 进而利用经验公式来计算地层完整性, 被认为是一种半定量方法. 定年技术, 包括放射性同位素和碳、氧同位素法, 可以有效地确定年轻地层的绝对年龄; 但一方面随着地层时代变老, 定年的精度逐渐下降(Sadler, 1981; Miall, 2015), 另一方面也很难准确测定沉积间断时间较短的间断面年龄区间(Sadler, 1981; Weedon, 2003).

水槽物理模拟实验能够很好地恢复碎屑岩剥蚀、搬运和沉积等随时间变化过程, 进而可以准确评价地层完整性(Straub和Foreman, 2018), 但该方法无法恢复地质尺度(时间和空间)的沉积演化过程, 且只能用于碎屑岩沉积研究. 随机模拟方法, 如布朗运动模型(Brownian motion model)(Sadler, 1981; Strauss和Sadler, 1989)和CTRW(Continuous Time Random Walk)模型(Schumer和Jerolmack, 2009), 可以对沉积物表面的沉积和剥蚀过程进行随机演化模拟, 进而计算不同时间步长的沉积速率和沉积间断时间, 但实际地质过程中地层沉积和剥蚀会受到一系列地质作用(如构造升降、海平面变化、水体能量、波浪作用和重力流沉积作用等)的影响, 而随机模拟无法考虑这些地质作用过程, 因此不被认为是严格的地质过程模拟模型(Schumer和Jerolmack, 2009).

不同于随机模型, 基于沉积过程的地层正演数值模拟(SFM)可以在初始沉积底面上, 以质量守恒和能量守恒基本原理为约束, 正演模拟沉积物侵蚀、搬运和沉积(生长)演化过程. 利用地层正演模拟结果可以同时提取描述地层充填演化过程的时间域和深度域(空间域)信息(Liu等, 1998; Burgess和Wright, 2003), 进而为地层完整性分析提供直接参数. 基于不同模拟算法、空间维度和所考虑地质作用因素, 目前国际上已形成多款可用于模拟碳酸盐岩沉积(生长)、剥蚀和搬运的正演模拟软件, 比如一维的pyReef-Core(Salles等, 2018), 二维的SEDPACK(Kendall等, 1991; Liu等, 1998)和CARBPLAT(Bosscher和Southam, 1992), 三维的Sed-sim(Cantrell等, 2015)、CARBONATE 3D(Warrlich等, 2002; Barrett和Webster, 2012)、CarbSim(Duan等, 2000)、DIONISOS(Granjeon和Joseph, 1999; Seard等, 2013)、GPM(Hill等, 2009)、CarboCAT(Burgess, 2013)和ReefSAM(Barrett和Webster, 2017)等, 并已经在不同沉积环境的构造-沉积演化过程恢复(Griffiths等, 2001; Hill等, 2009; Salles等, 2010; Barrett和Webster, 2012)、控制因素和形成机制探讨(Burgess, 2001; Warrlich等, 2005; Salles等, 2010; Busson等, 2019)以及烃源岩(Brunneau等, 2018)和有利储层(Cantrell等, 2015)分布预测等方面成功应用, 但这些研究大都侧重于深度域内模拟结果分析, 很少有学者强调要利用时间域和深度域耦合的方法综合分析地层构造-沉积演化过程, 也缺少基于模拟结果的地层完整性及其影响因素定量探讨.

本文首先利用基于沉积过程的地层正演模拟方法, 建立一个涵盖不同沉积环境的碳酸盐岩沉积演化三维地质模型; 然后从模拟结果中获取不同位置虚拟井的时间域和深度域信息, 定量刻画不同沉积环境下碳酸盐岩地层沉积记录时间、不整合面和间断时间, 定量评价盆地中不同位置地层完整性; 最后, 通过敏感性分析定量探讨影响碳酸盐岩地层完整性的控制因素. 尽管在以往的沉积学研究中, 人们习惯于在深度域中分析地层沉积特征及其演化等, 但是开展时间域内地层沉积演化研究同样非常重要, 尤其对于一些事件性沉积(如重力流沉积)的识别和刻画以及盆地构造-沉积演化的全过程恢复等. 本文力图对盆地沉积演化全过程恢复及地层完整性定量评价提供一种新的方法和分析视角.

2 方法和参数

本次研究利用SedSim地层正演数值模拟软件来模拟碳酸盐岩沉积(生长)、剥蚀和沉积改造三维演化过程。SedSim最初是由美国斯坦福大学于20世纪80年代开发的一款基于水动力学原理的碎屑岩地层正演模拟软件(Tetzlaff和Harbaugh, 1989), 后来经澳大利亚阿德莱德大学和联邦科学与工业研究组织(CSIRO)改进与完善, 增加了碳酸盐岩和有机质生长、风成沉积以及碎屑岩与碳酸盐岩/有机质混合沉积模拟功能(Griffiths和Paraschivoiu, 1998; Griffiths等, 2001)。该软件应用模糊逻辑算法(Nordlund, 1999)模拟碳酸盐岩沉积, 其主要优势是可以很容易地将定性描述语言转换成定量数据表达并应用到数值模型建立过程中(Nordlund, 1996; Parcell, 2003)。这种算法对于地质过程模拟非常有效, 因为大部分地质过程表征都是用定性的描述性语言, 且很难进行准确量化。比如, 在用模糊逻辑算法模拟碳酸盐岩礁体生长时, 可将其利用模糊逻辑语言表述为: “如果水体深度较浅、温度适中、盐度正常且波浪作用强烈, 则碳酸盐岩礁体生长速率较快”, 说明生物礁生长受水体深度、温度、盐度和波浪强度共同作用, 只有当四个条件同时完全满足时, 礁体生长速率才能达到最大, 如果个别条件没完全满足但仍在可接受范围内(即在模糊逻辑集范围内), 则礁体生长速率会降低, 但当有一个或多个生长条件完全落在可接受范围外(即在模糊逻辑集范围外), 则礁体生长速率将为零。模糊逻辑算法在地层模拟应用的具体原理、步骤和实例可参考Nordlund(1996, 1999)、Parcell(2003)、Demicco和Klir(2004)以及Salles等(2018)的研究。基于模糊逻辑的碳酸盐岩地层正演模拟能充分考虑多种影响碳酸盐岩生长的控制因素, 如水深、温度、盐度、水动力、沉积物输入等, 被认为是众多软件中考虑地质因素较多、相对较灵活和高效的模拟计算方法(Perfileva, 2004)。

SedSim可模拟碳酸盐岩地层暴露剥蚀过程和滑塌重力流沉积。当碳酸盐岩地层暴露地表时, 岩溶作用发生, 不同相带碳酸盐岩地层以一致的速率进行剥蚀且无剥蚀后残留物生成(Salles等, 2018)。构造沉降作用、碳酸盐岩快速生长及由海平面下降引起的地层暴露均会导致碳酸盐岩沉积斜坡过陡, 当沉积斜坡角度大于碳酸盐岩临界滑塌坡角时, 滑塌作用发生, 高浓

度滑塌重力流会在水动力学方程约束下向势能低处流动, 并随流体速度变化而发生侵蚀、搬运和沉积(Tetzlaff和Harbaugh, 1989; Salles等, 2010)。

地层正演模拟结果包含三维空间岩相、沉积相等随时间演化信息, 利用模拟结果可将任意位置处地层沉积演化的时间域和深度域信息同时提取出来。如图1表示碳酸盐岩台地相任意位置的地层时间域和深度域信息, 对比地层原始沉积厚度与最终保存地层厚度可以发现并非所有原始沉积物最终得到保存, 大部分原始沉积物在碳酸盐岩台地演化过程中发生剥蚀并形成多个沉积间断面, 保存的沉积物在时间域内只占总时间的很少部分(图1中黑色填充矩形)。利用地层模拟结果可定量获取有沉积记录所对应的时间并用于计算地层完整性。

本文所建立的概念模型包含了不同相带的碳酸盐岩沉积, 模型大小设置为100km×100km, 网格分辨率为0.5km×0.5km, 模拟时间为2Myr。初始底形包括碳酸盐岩台地、斜坡和盆地三个相带, 其中台地相又分为潮坪、潟湖和台地边缘亚相。模拟过程中构造沉降设置为恒定速率, 为100m Myr⁻¹。根据碳酸盐岩沉积(生长)与水体深度之间的负相关关系, 本次研究共设置了四种类型碳酸盐岩, 分别定义为“类型1”“类型2”“类型3”和“远洋沉积”, 并分别建立了模糊逻辑函数集(图2a)。依据前人对古代和现代不同相带碳酸盐岩生长速率的统计结果(Sadler, 1981; Enos, 1991), 本次模拟将浅水(≤10m)碳酸盐岩(类型1)最大生长速率设置为1000m Myr⁻¹, 并随水体深度增加碳酸盐岩生长速率逐渐降低(图2a)。Montaggioni等(2015)研究表明碳酸盐岩

图1 碳酸盐岩台地相概念模型中原始沉积厚度随时间演化和最终保存的沉积物厚度与时间记录

时间轴: 黑色填充部分对应于“地层保存下来的沉积时间”, 白色填充部分对应于“沉积间断时间”

图2 四种类型碳酸盐岩沉积速率与水体深度之间关系(a)、高频海平面变化曲线(b)、三维岩相模拟结果(c)、盆地西-东向二维岩相和沉积相(古水深)模拟结果((d)和(e))

(c)中黄色虚线展示图(d)和(e)中剖面位置; (e)中PW1、PW2和PW3为三口不同沉积相带的虚拟井

暴露剥蚀速率一般为 $10\sim 300\text{ m Myr}^{-1}$, 本文将剥蚀速率设置为 100 m Myr^{-1} . 许多学者强调, 高频米兰科维奇天文旋回会在低频海平面变化趋势上控制高频碳酸盐岩沉积旋回的形成(Hinnov, 2000; Forkner等, 2010), 因此本次模拟在两个三级海平面变化旋回基础上, 叠加冰室气候背景下高振幅的四级($\sim 100\text{ ka/旋回}$)(Barnett等, 2002)和五级($\sim 20\text{ ka/旋回}$)海平面变化曲线, 最终建立高频的海平面变化曲线(图2b).

3 结果

图2c中三维岩相模拟结果显示, 类型1和类型2碳酸盐岩主要发育在台地相且沉积厚度相对较大, 类型3碳酸盐岩主要发育在斜坡相, 少部分发育在潟湖亚相底部, 而远洋沉积物发育在深水盆地相, 沉积厚度

较薄. 图2d东西向岩相剖面显示, 部分浅水碳酸盐岩台地相沉积物(类型1和类型2)和斜坡相沉积物(类型3)在深水盆地与远洋沉积物交互发育, 指示了台地边缘和斜坡带发生过多期沉积滑塌事件, 滑塌沉积物搬运至盆地相形成深水重力流沉积(MTDs). 尽管模拟过程中由构造沉降和海平面升降引起的可容空间变化范围较大, 但古水深结果显示, 台地相碳酸盐岩的水体深度变化基本保持在 20 m 以浅, 潟湖亚相早期沉积类型3碳酸盐岩, 后期由于相对海平面下降而持续沉积较浅水的潮下带和潮间带碳酸盐岩(图2e).

选取不同沉积相带中三口虚拟井(PW1、PW2和PW3, 位置见图2c和2e), 从地层正演模拟结果分别提取各自深度域和时间域内沉积演化信息, 通过建立单井时空演化剖面分析各单井沉积演化全过程和地层完整性. 如图3a所示, PW1井位于台地边缘亚相, 主要为

图3 虚拟井PW1(a)、PW2(b)和PW3(c)的深度域(左)和时间域(右)1D演化剖面

分别对应于台地边缘亚相、斜坡相和深水盆地相沉积环境, 中间剖面展示相应的地层记录和剥蚀时间

潮间带和相对浅水的潮下带沉积, 单井地层剖面在深度域内看似连续, 但在时间域内可识别出8个不同级次沉积不整合面, 沉积间断时间在0.035~0.66Myr。时间域剖面记录了多期原始沉积物的沉积-剥蚀事件, 指示原始沉积物一般在相对较短时间内沉积, 后期随相对海平面变化暴露地表而部分或全部被剥蚀。以5ka为时间步长, 即每5ka统计一次该时间段内是否有沉积记录, PW1井的地层完整性只有15%, 说明台地边缘亚相沉积在大部分时间并未能被保存下来, 有沉积记录的地层时间仅占总沉积时间的很少一部分。如图3b所示, PW2井位于碳酸盐岩斜坡相带, 主要发育相对深水的潮下带和斜坡带沉积, 在岩相剖面(深度域)中无明显沉积相突变。时间域剖面则显示, PW2井最初以相对深水的潮下带和斜坡带沉积为主且沉积速率较低, 后期随海平面下降, 水体变浅, 快速沉积了厚层浅水碳酸盐相, 造成了沉积斜坡过陡并发生滑塌, 导致约86.6m沉积物滑塌, 使早期沉积的浅水碳酸盐相全部

被剥蚀, 随后海平面再次上升, PW2地区再次沉积相对深水的潮下带和斜坡带沉积物。保存的地层中有两个不整合面, 分别发育在110和140m处, 沉积间断时间分别为0.19和0.30Myr。使用5ka时间步长, PW2井的地层完整性约为76%。如图3c所示, PW3井主要发育深水盆地相沉积且沉积速率很低, 但时间域剖面显示多次沉积速率突然增大情景, 指示了多期重力流事件性沉积, 由于台地边缘或斜坡带沉积斜坡过陡, 发生斜坡滑塌, 重力流沉积物搬运至深水盆地相, 形成这种沉积厚度突然增大现象。PW3井时间域剖面显示, 重力流沉积主要发育在高频海平面下降时期。以5ka为时间步长, PW3井的地层完整性为100%, 说明所有原始沉积物均被保存下来。

4 讨论

Sadler(1981)、Sadler和Strauss(1990)强调地层完

表 1 不同地层正演模拟方案中的主要输入参数

模拟方案	初始沉积底形	构造沉降样式	海平面变化幅度	$R_{\max}$ (m Myr ⁻¹)	剥蚀速率 (m Myr ⁻¹)
1	基本模型	线性	温室时期气候背景	500	100
2	基本模型	线性	温室时期气候背景	600	100
3	基本模型	线性	温室时期气候背景	700	100
4	基本模型	线性	温室时期气候背景	800	100
5	基本模型	线性	温室时期气候背景	900	100
6	基本模型	线性	温室时期气候背景	1000	100
7	基本模型	线性	冰室时期气候背景	500	100
8	基本模型	线性	冰室时期气候背景	600	100
9	基本模型	线性	冰室时期气候背景	700	100
10	基本模型	线性	冰室时期气候背景	800	100
11	基本模型	线性	冰室时期气候背景	900	100
12	基本模型	线性	冰室时期气候背景	1000	100
13	基本模型	由慢到快	冰室时期气候背景	1000	100
14	基本模型	由快到慢	冰室时期气候背景	1000	100
15	基本模型	阶梯状	冰室时期气候背景	1000	100

完整性大小受所选择时间步长的控制, 当选择较大时间步长时, 计算得到地层完整性数值也会较高。其他外部因素, 如沉积环境、海平面变化、碳酸盐岩生长速率和构造沉降样式等, 也会在一定程度上影响碳酸盐岩的地层完整性。基于上述基本模型, 通过改变海平面变化幅度(如分别在冰室和温室气候背景下)、浅水碳酸盐岩最大生长速率($R_{\max}$)和构造沉降样式, 建立15个地层正演模拟模型, 开展参数敏感性分析(表1), 计算得到75个碳酸盐岩地层完整性数据。结果显示, 当以20ka为时间步长时, 计算得到台地边缘和潮坪亚相地层完整性为23~50%、潟湖亚相地层完整性为44~55%、斜坡相和深水盆地相地层完整性分别为76~100%和100%(图4a), 说明地层完整性与沉积环境有关, 且一般随着沉积水深变浅, 地层完整性降低。温室气候背景下的高频海平面变化比冰室气候条件下幅度小, 基于多组模拟结果的地层完整性对比显示, 除了盆地相(均为100%), 其他相带在冰室时期的碳酸盐岩地层完整性均比温室时期低(图4a), 说明海平面变化幅度也会在一定程度上影响碳酸盐岩地层完整性, 且高频海平面变化幅度越大、碳酸盐岩地层完整性越低。以台地边缘亚相为例, 随着浅水碳酸盐岩最大生长速率($R_{\max}$)增大, 冰室时期的碳酸盐岩地层完整性(f_c)表现

图 4 碳酸盐岩地层完整性与沉积环境、气候背景和浅水碳酸盐岩最大生长速率之间的定量关系(a)、四种构造沉降样式示意图(b)以及碳酸盐岩地层完整性与不同构造样式之间的定量关系(c)

为逐渐减小趋势, 而温室时期的地层完整性则表现为与 $R_{\max}$ 没有明显相关性(图4a内插图), 说明 $R_{\max}$ 只对冰室时期的碳酸盐岩地层完整性有明显影响且为负相关关系. 在基本模型基础上, 通过分别设置构造沉降为线性、先慢后快、先快后慢和阶梯状沉降四种样式开展模拟(图4b), 分析不同构造样式对碳酸盐岩地层完整性的影响. 结果显示, 构造沉降样式对潮坪亚相、台地边缘亚相和盆地相地层完整性影响较小, 而对潟湖亚相和斜坡相地层完整性计算结果有明显影响, 表现为早期构造沉降速率越高、地层完整性也越高的特征(图4c), 原因可能由于这两个沉积相均处于水体深度由浅向深变化带, 早期快速构造沉降会使水体深度进一步增大, 进而使沉积物处于水面以下的时间延长, 导致地层完整性增高.

综上所述, 基于地层正演模拟结果的定量分析方法可以有效地计算盆地中任意位置处的地层完整性, 并同时利用深度域和时间域信息更全面和定量地恢复地层沉积演化过程, 且能够有效识别深度域剖面中不易观察到的地质现象和作用过程. 此外, 地层不整合面的有效识别、沉积间断时间和地层完整性的定量获取, 还能为储集层评价、油气运移通道和聚集位置预测提供一定参考.

5 结论

(1) 基于沉积过程的地层正演数值模拟是一种定量评价地层完整性的有效方法. 地层正演模拟结果可以提取研究盆地任意位置的时间域和深度域信息, 能够用于定量分析地层沉积、剥蚀及事件性沉积演化全过程、定量刻画沉积间断及其持续时间和计算地层完整性.

(2) 地层正演模拟结果表明, 碳酸盐岩地层完整性受沉积环境、海平面升降幅度、碳酸盐岩生长速率和构造沉降样式影响, 且诸因素影响方式和作用结果各异. 该结论具有一定普遍意义, 但在针对实际地层开展完整性评价时, 可能还需考虑更多约束条件.

致谢 作者对美国南卡罗莱纳大学Chris Kendall教授和澳大利亚科廷大学Cedric Griffith教授在地层正演模拟方向的启蒙和指导表示谢意, 感谢中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院金之钧院士对本研究的支持和

鼓励, 感谢两位审稿专家对文章修改与完善提出的宝贵建议.

参考文献

- 杨磊磊, 陈冬华, 于林姣, 刘建良. 2020. 成岩早期大气淡水淋滤作用对碳酸盐岩储集层的影响——以塔里木盆地顺南地区为例. 矿物岩石地球化学通报, doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2020.39.055
- Ager D V. 1973. The Nature of the Stratigraphic Record. New York: Wiley. 114
- Algeo T J, Wilkinson B H. 1988. Periodicity of mesoscale Phanerozoic sedimentary cycles and the role of Milankovitch orbital modulation. *J Geol*, 96: 313–322
- Allan J R, Matthews R K. 1982. Isotope signatures associated with early meteoric diagenesis. *Sedimentology*, 29: 797–817
- Barnett A J, Burgess P M, Wright V P. 2002. Icehouse world sea-level behaviour and resulting stratal patterns in late Viséan (Mississippian) carbonate platforms: Integration of numerical forward modelling and outcrop studies. *Basin Res*, 14: 417–438
- Barrell J. 1917. Rhythms and the measurements of geologic time. *Geol Soc Am Bull*, 28: 745–904
- Barrett S J, Webster J M. 2017. Reef Sedimentary Accretion Model (ReefSAM): Understanding coral reef evolution on Holocene time scales using 3D stratigraphic forward modelling. *Mar Geol*, 391: 108–126
- Barrett S J, Webster J M. 2012. Holocene evolution of the Great Barrier Reef: Insights from 3D numerical modelling. *Sediment Geol*, 265–266: 56–71
- Bosscher H, Southam J. 1992. CARBPLAT—A computer model to simulate the development of carbonate platforms. *Geology*, 20: 235–238
- Bruneau B, Chauveau B, Duarte L V, Desaubliaux G, Moretti I, Baudin F. 2018. 3D numerical modelling of marine organic matter distribution: Example of the early Jurassic sequences of the Lusitanian Basin (Portugal). *Basin Res*, 30: 101–123
- Burgess P M. 2001. Modeling carbonate sequence development without relative sea-level oscillations. *Geology*, 29: 1127–1130
- Burgess P M. 2013. CarboCAT: A cellular automata model of heterogeneous carbonate strata. *Comput Geosci*, 53: 129–140
- Burgess P M, Wright V P. 2003. Numerical forward modelling of carbonate platform dynamics: An evaluation of complexity and completeness in carbonate strata. *J Sediment Res*, 73: 637–652
- Busson J, Joseph P, Mulder T, Teles V, Borgomano J, Granjeon D, Betzler C, Poli E, Wunsch M. 2019. High-resolution stratigraphic forward modeling of a Quaternary carbonate margin: Controls and dynamic of the progradation. *Sediment Geol*, 379: 77–96

- Cantrell D L, Griffiths C M, Hughes G W. 2015. New tools and approaches in carbonate reservoir quality prediction: A case history from the Shu'aiba Formation, Saudi Arabia. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 406: 401–425
- Demicco R V, Klir G J. 2004. *Fuzzy Logic in Geology*. Amsterdam: Elsevier Academic Press. 347
- Duan T, Cross T A, Lessenger M A. 2000. 3-D carbonate stratigraphic model based on energy and sediment flux. In: AAPG annual convention, New Orleans, Louisiana
- Durkin P R, Hubbard S M, Holbrook J, Boyd R. 2018. Evolution of fluvial meander-belt deposits and implications for the completeness of the stratigraphic record. *GSA Bull*, 130: 721–739
- Elrick M, Scott L A. 2010. Carbon and oxygen isotope evidence for high-frequency (104–105 yr) and My-scale glacio-eustasy in Middle Pennsylvanian cyclic carbonates (Gray Mesa Formation), central New Mexico. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 285: 307–320
- Enos P. 1991. Sedimentary parameters for computer modeling. In: Franseen E K, Watney W L, Kendall C G S C, Ross W, eds. *Sedimentary Modeling: Computer Simulations and Methods for Improved Parameter Definition*. Kansas Geol Survey Bull, 233: 63–99
- Forkner R M, Hinnov L A, Smart P. 2010. Use of insolation as a proxy for high-frequency eustasy in forward modeling of platform carbonate cyclostratigraphy—A promising approach. *Sediment Geol*, 231: 1–13
- Granjeon D, Joseph P. 1999. Concepts and applications of a 3D multiple lithology, diffusive model in stratigraphic modeling. In: Harbaugh J W, Watney W L, Rankey E C, Slingerland R, Goldstein R H, Franseen E K, eds. *Numerical Experiments in Stratigraphy: Recent Advances in Stratigraphic and Sedimentologic Computer Simulations*. SEPM Spec Publ, 62: 197–210
- Griffiths C M, Dyt C, Paraschivoiu E, Liu K. 2001. SedSim in hydrocarbon exploration. In: Merriam D, Davis J C, eds. *Geologic Modelling and Simulation*. New York: Kluwer Academic
- Griffiths C M, Paraschivoiu E. 1998. Three-dimensional forward stratigraphic modeling of early cretaceous sedimentation on the Leveque and Yampi Shelves, Browse Basin. *APPEA J*, 38: 147–158
- Hill J, Tetzlaff D, Curtis A, Wood R. 2009. Modeling shallow marine carbonate depositional systems. *Comput Geosci*, 35: 1862–1874
- Hinnov L A. 2000. New perspectives on orbitally forced stratigraphy. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 28: 419–475
- Hutton J. 1788. *Theory of the Earth: Investigation into laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe*. Earth Environ Sc Trans Royal Soc Edinburgh, 1: 304
- Kemp D B. 2011. Shallow-water records of astronomical forcing and the eccentricity paradox. *Geology*, 39: 491–494
- Kendall C G S C, Strobel J, Cannon R, Bezdek J, Biswas G. 1991. The simulation of the sedimentary fill of basins. *J Geophys Res*, 96: 6911–6929
- Liu K, Liang T C K, Paterson L, Kendall C G S C. 1998. Computer simulation of the influence of basin physiography on condensed section deposition and maximum flooding. *Sediment Geol*, 122: 181–191
- Miall A D. 2015. Updating uniformitarianism: Stratigraphy as just a set of 'frozen accidents'. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 404: 11–36
- Miller T G. 1965. Time in stratigraphy. *Palaeontology*, 8: 113–131
- Montaggioni L F, Borgomano J, Fournier F, Granjeon D. 2015. Quaternary atoll development: New insights from the two-dimensional stratigraphic forward modelling of Mururoa Island (Central Pacific Ocean). *Sedimentology*, 62: 466–500
- Nordlund U. 1996. Formalising geological knowledge: With an example of stratigraphic modeling using fuzzy logic. *SEPM JSR*, 66: 689–698
- Nordlund U. 1999. FUZZIM: Forward stratigraphic modeling made simple. *Comput Geosci*, 25: 449–456
- Parcell W C. 2003. Evaluating the development of Upper Jurassic reefs in the Smackover Formation, Eastern Gulf Coast, U.S.A. through fuzzy logic computer modeling. *J Sediment Res*, 73: 498–515
- Perfilieva I. 2004. Fuzzy transform: Application to reef growth problem. In: Demicco R V, Klir G J, eds. *Fuzzy Logic in Geology*. 275–300
- Rameil N, Immenhauser A, Csoma A É, Warrlich G. 2012. Surfaces with a long history: The Aptian top Shu'aiba Formation unconformity, Sultanate of Oman. *Sedimentology*, 59: 212–248
- Sadler P M. 1981. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections. *J Geol*, 89: 569–584
- Sadler P M. 1994. The expected duration of upward-shallowing peritidal carbonate cycles and their terminal hiatuses. *Geol Soc Am Bull*, 106: 791–802
- Sadler P M, Strauss D J. 1990. Estimation of completeness of stratigraphical sections using empirical data and theoretical models. *J Geol Soc*, 147: 471–485
- Salles T, Marchès E, Dyt C, Griffiths C, Hanquiez V, Mulder T. 2010. Simulation of the interactions between gravity processes and contour currents on the Algarve Margin (South Portugal) using the stratigraphic forward model SedSim. *Sediment Geol*, 229: 95–109
- Salles T, Pall J, Webster J M, Dechnik B. 2018. Exploring coral reef responses to millennial-scale climatic forcings: Insights from the 1-D numerical tool pyReef-Core v1.0. *Geosci Model Dev*, 11: 2093–2110
- Sattler U, Immenhauser A, Hillgartner H, Esteban M. 2005. Characterization, lateral variability and lateral extent of discontinuity surfaces on a carbonate platform (Barremian to Lower Aptian,

- Oman). *Sedimentology*, 52: 339–361
- Schumer R, Jerolmack D J. 2009. Real and apparent changes in sediment deposition rates through time. *J Geophys Res*, 114: F00A06
- Searid C, Borgomano J, Granjeon D, Camoin G. 2013. Impact of environmental parameters on coral reef development and drowning: Forward modelling of the last deglacial reefs from Tahiti (French Polynesia, IODP Expedition #310). *Sedimentology*, 60: 1357–1388
- Straub K M, Foreman B Z. 2018. Geomorphic stasis and spatiotemporal scales of stratigraphic completeness. *Geology*, 46: 311–314
- Strauss D, Sadler P M. 1989. Stochastic models for the completeness of stratigraphic sections. *Math Geol*, 21: 37–59
- Tetzlaff D M, Harbaugh J W. 1989. Simulating clastic sedimentation. In: *Computer Methods in Geosciences*. New York: Van Nostrand Reinhold. 196
- Tipper J C. 1983. Rates of sedimentation, and stratigraphical completeness. *Nature*, 302: 696–698
- Warrlich G, Bosence D, Waltham D. 2005. 3D and 4D controls on carbonate depositional systems: Sedimentological and sequence stratigraphic analysis of an attached carbonate platform and atoll (Miocene, Nijar Basin, SE Spain). *Sedimentology*, 52: 363–389
- Warrlich G M D, Waltham D A, Bosence D W J. 2002. Quantifying the sequence stratigraphy and drowning mechanisms of atolls using a new 3-D forward stratigraphic modelling program (CARBONATE 3D). *Basin Res*, 14: 379–400
- Weedon G P. 2003. *Time-series Analysis and Cyclostratigraphy: Examining Stratigraphic Records of Environmental Cycles*. Cambridge UK: Cambridge University Press. 276

(责任编辑: 朱茂炎)