

陆相层序地层构型与沉积模拟研究现状及进展*

邵龙义¹ 王浪浪^{1,2} 连豪杰¹ 朱红涛³ 朱筱敏⁴

1 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2 贵州省自然资源勘测规划研究院, 贵州贵阳 550004

3 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北武汉 430070

4 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

摘要 层序地层学作为一种新的盆地分析方法, 受到广大地质学家的重视, 尤其是陆相层序构型与数值模拟研究已成为一个国际性热门方向。文中总结了陆相层序构型在国内外的研究进展, 介绍了国外近年来的“下游控制区”和“上游控制区”概念以及层序构型特征, “下游控制区”发育依赖于相对海(湖)平面变化的“低位正常海(湖)退”、“海(湖)侵”、“高位正常海(湖)退”和“下降阶段”体系域, “上游控制区”发育不依赖相对海(湖)平面变化的高河道合并体系域和低河道合并体系域。国内层序构型研究也有多种观点, 最有代表性的应该是“L型、T型、TH型、H型(E-H型和L-H型)”层序构型的划分。陆相层序模拟已经从水槽物理实验为主发展到当今以数值模拟及水槽实验并举的时代。在介绍层序数值模拟发展史、国内外研究现状的基础上, 重点介绍了 SEDPAK 正演化模拟、SEDSIM 正演数值模拟、基于 Delft3D 模型的三维正演模拟、DI-ONISOS 的三维正演模拟及基于 N-S 方程的层序数值模拟等 5 种数值模拟方法, 总结了陆相湖盆层序构型及数值模拟在油气勘探开发领域的应用情况, 分析了目前存在的理论问题、数值模拟技术难点及数值模拟未来的发展方向。

关键词 陆相层序地层 下游控制区 上游控制区 层序构型 数值模拟

第一作者简介 邵龙义, 男, 1964 年生, 博士生导师, 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院教授, 工学博士, 长期从事沉积学和煤田地质学教学及研究工作。E-mail: ShaoL@cumtb.edu.cn。

中图分类号: P588.22 文献标志码: A

Current status and progress in nonmarine sequence
architecture and sedimentary modellingSHAO Longyi¹ WANG Langlang^{1,2} LIAN Haojie¹ ZHU Hongtao³ ZHU Xiaomin⁴

1 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2 Guizhou Institute of Natural Resources Planning and Survey, Guiyang 550004, China

3 School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430070, China

4 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract Sequence stratigraphy, as a new method for basin analysis, has received great attention from geologists, especially in the study of continental sequence architecture and numerical modelling,

* 国家自然科学基金项目(编号: 42321002, 41572090)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42321002, 41572090)]

收稿日期: 2024-11-30 改回日期: 2024-12-18

which has become an international hot topic. This article summarizes the current research progress of non-marine sequence architecture at home and abroad, introduces the concepts of “downstream-controlled area” and “upstream-controlled area” and their respective sequence architecture characteristics in recent years abroad. The sequence architecture of “downstream-controlled area” depends on relative sea (lake) level changes, and the “lowstand normal regression”, “transgressive”, “highstand normal regression” and “falling stage” systems tracts are developed, while the sequence architecture of “upstream-controlled area” does not depend on relative sea (lake) level changes, and the high (channel) amalgamation and the low (channel) amalgamation systems tracts are developed. There are also various views on “sequence architecture” in China, and the most representative one should be the classification of “L-type, T-type, TH-type, H-type (E-H type and L-H type)” sequence architectures. The modelling of nonmarine sequences has evolved from being dominated by the physical flume experiments to the current era of combining flume experiments with numerical simulation. Based on the introduction of the development history and research status of sequence numerical simulation at home and abroad, this article focuses on five numerical simulation methods, including SEDPAK forward modelling, SEDSIM forward modelling, three-dimensional forward modelling based on Delft3D model, DIONISOS three-dimensional forward modeling, and sequence numerical modeling based on the N-S equation. The paper has also summarized the sequence architecture of continental lacustrine basins and the application of numerical modeling in the field of oil and gas exploration and development, and analyzed the current theoretical challenges, difficulties in numerical modeling technology, and future development directions of numerical modelling.

Key words nonmarine sequence stratigraphy, downstream-controlled area, upstream-controlled area, sequence architecture, numerical modelling

About the first author SHAO Longyi, born in 1964, is a professor and doctoral supervisor at the College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), with main research interests in sedimentology and coal geology. E-mai: ShaoL@cumtb.edu.cn.

0 引言

层序地层学作为一种新的盆地分析方法,受到广大地质学家的重视。陆相湖盆层序地层学在国内外的研究也取得一系列成果与进展 (Carroll and Bohacs, 1999; 朱筱敏等, 2003; 邵龙义等, 2021; Benavente and Bohacs, 2024; Zavala *et al.*, 2024), 尤其是关于陆相层序构型及陆相层序数值模拟的研究, 成为沉积学关注的焦点, 并广泛应用于国内多个陆相盆地的沉积学研究中 (姜在兴, 1996; 王华, 2008; 纪友亮和周勇, 2020; 朱筱敏等, 2023)。层序地层学是一种根据沉积岩的层序叠置样式来描述、解释、分类和命名的地层学 (Catuneanu, 2006)。层序叠置样式是层序地层学方法的核心, 它为层序地层学所有单元和界面的定义提供了标准, 层序地层界面是一种地层接触面, 其间地层叠置样式会发生变化 (朱筱敏, 2022)。层序地层单元是由其层序叠置样式和层序地层界面

限定和表征的沉积物或沉积体。同一类型的叠置样式可以在不同的尺度上观察到, 在每个具体的观察尺度上, 叠置样式决定了该尺度上的体系域, 并指示了层序地层界面的位置 (Catuneanu, 2019)。

将绝对海平面变化看作是层序几何形态主要控制因素的构想, 在后来的许多研究中遭到质疑和批评。首先, 人们已经认识到构造沉降和绝对海平面变化相互作用产生的相对海平面变化在控制层序模式中的重要性 (Posamentier and Vail, 1988); 其次, 层序地层学最初模式未能充分重视沉积物供给这一因素, 尤其在远离滨岸线的陆地环境, 许多研究已经证明, 沉积物供给的变化在决定陆相层序几何形态方面起着十分重要的作用 (Thorne and Swift, 1991; Shanley and McCabe, 1994); 此外, 由于缺乏足够的生物地层分辨率, 层序边界的全球等时性也受到质疑 (Miall, 1992)。

计算机科学技术的不断发展使得各学科的研究

都趋于数据化、数值化及智能化，计算机技术成为广大学者研究的有力工具，层序地层学也不例外，定量化的层序数值模拟研究已经有了较快的发展和广泛应用。层序数值模拟的优点在于它可以依其控制要素的定义而进行较严格的限定，并可以进行更严密的验证（Cross and Lessenger, 1999），这类模拟研究可定量描述自然界中的沉积机理与沉积过程，有助于解释地层记录的控制因素（Steckler *et al.*, 1993）。定量模型通过对侵蚀作用面、搬运作用面、沉积作用面的演化过程的模拟，可为层序构型形成过程提供解释基础（Nummedal *et al.*, 1993；林承焰等，2023）。

鉴于此，作者对陆相层序构型及数值模拟的研究现状进行综述，并对其在盆地分析、油气勘探等方面的应用进行总结，最后对其存在的问题及发展趋势作简要分析。

1 国内外层序地层构型研究现状

随着层序地层学概念的引入，中国学者分别对国内各大陆相盆地进行大量层序地层学相关的研究。关于“层序构型”这一术语，最初国内学者叫法并不统一，除了体系域构型（胡受权，1998）一词外，分别还用层序样式（朱筱敏等，2003）、层序结构（纪友亮等，2009）、层序构成（邓宏文等，2004）、层序模式（姜在兴等，2009）等术语，但无论用哪种术语，均是对 Vail 经典层序地层构型的表征，也是将层序地层学理论“中国化”的体现，即将国外经典层序地层学理论具体应用到中国的各大陆相湖盆的研究中。因此，总结陆相层序地层构型的研究现状，就需要厘清海相层序地层构型和陆相层序地层之间的区别与联系。

国外针对层序构型控制因素已经有较多的讨论，普遍认为沉积记录的地层构型是多种异旋回成因和自旋回成因机制相互作用的结果。尽管层序地层构型的控制因素比较复杂，但是所有对地层构型有影响的控制因素最终都可归结为 2 个基本变量：即可容空间和沉积作用，利用这 2 个变量即可解释地层叠置样式的成因，因此可容空间和沉积作用的概念对层序地层学方法以及相关的术语命名来说至关重要（Catuneanu, 2019）。

1.1 国外层序构型研究现状

沉积层序是由陆上不整合面或其相对整合面为

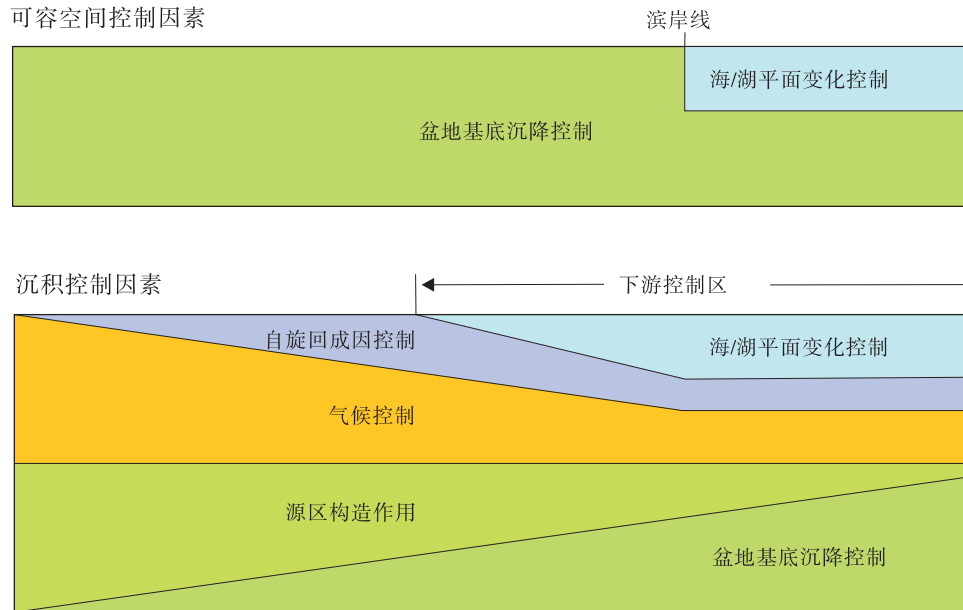
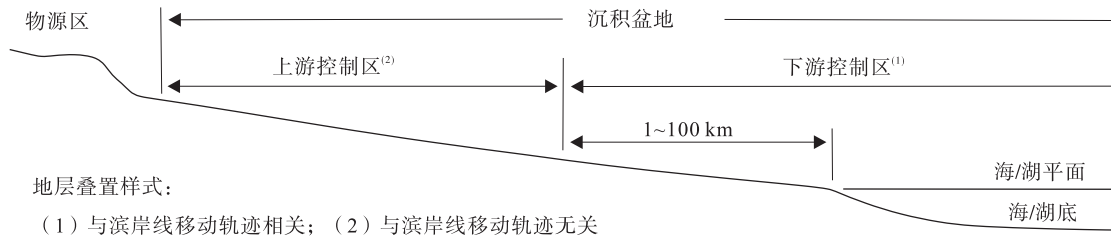
界的地层层序（Mitchum Jr *et al.*, 1977）。随着层序地层学的兴起和发展，形成了不同层序地层学学派，主要包括 Vail 沉积层序模式（Vail *et al.*, 1977）、Galloway（1989）的成因地层层序、Embry 和 Johannessen（1992）主张的“海侵—海退”层序以及北美地层学术语委员会的异旋回地层学（Allostratigraphy）（NACSN, 1983），但是目前比较流行的仍然是 Posamentier 和 Vail（1988）提出的 LST-TST-HST 层序地层模式（Vail *et al.*, 1977）。不同学派所主张的层序地层构型模式虽不相同，但所有类型的沉积层序都假定了可容空间的完整变化周期，并将层序边界与负可容空间阶段联系起来。然而，在相对海（湖）平面上升和海（湖）侵阶段，也可能形成陆上不整合面。沉积层序的概念适用于可能形成暴露不整合面的下游控制区，同样也适用于形成暴露不整合面的上游控制区，只是下游控制区层序结构与滨线移动轨迹密切相关，而上游控制区层序结构则与滨线移动轨迹无关联（Catuneanu, 2019）。根据观察到的叠置样式和地层关系，Catuneanu（2019）区分出下游控制区和上游控制区，重新定义体系域特征及层序构型（图 1）。

1.1.1 下游控制区层序构型

在下游控制区，地层叠置样式与滨岸线轨迹相关联，包括步进（Forestepping）和步升（Upstepping）（即正常海（湖）退）、步退（Backstepping）和步升（即海（湖）侵）以及步进和步降（Downstepping）（即强制海（湖）退）的组合（Catuneanu, 2019），相应的地层关系限定了层序内部的低位、海（湖）侵、高位、下降阶段等 4 个体系域类型。

在海洋（或湖泊）环境中，可容空间的变化通过相对海（湖）平面的变化来测量，相对海平面变化解释了绝对海平面上升和盆地沉降对可容空间的联合控制。相对海（湖）平面上升产生了可容空间，沉积消耗了可容空间。滨岸环境中的可容空间和沉积供给作用之间的相互作用控制着岸线的轨迹，同时也限定了与“传统”体系域相关的地层叠置样式（Catuneanu *et al.*, 2011）。

相对海（湖）平面变化影响海（湖）相沉积盆地下游控制区海（湖）岸线两侧的沉积。根据地形坡度和河流尺度，下游控制区可从海（湖）岸线向上延伸至大陆上百千米（Blum and



注: 下游控制区层序构型与滨线移动轨迹密切相关, 而上游控制区层序构型则与滨线移动轨迹无关联

图 1 层序构型的可容空间和沉积作用的控制 (据 Catuneanu, 2019; Elsevier 许可证号: 5932320989344)

Fig. 1 Controls on accommodation and sedimentation of sequence architecture (after Catuneanu, 2019; with permission from Elsevier: 5932320989344)

Törnqvist, 2000), 也可能从海(湖)岸线向下延伸上千千米至深水环境 (Catuneanu, 2019)。下游控制区在层序地层学理论体系的发展历程中起着重要作用, “传统的”层序地层模型, 包括“低位”、“海(湖)侵”、“高位”和“下降阶段”体系域, 都是与相对海(湖)平面变化相关的地层构型 (Vail *et al.*, 1977; Posamentier and Vail, 1988; Hunt and Tucker, 1992)。

1.1.2 上游控制区层序构型

上游控制区的层序地层学属于“非传统的”层序地层学的范畴, 即层序地层格架在相对海(湖)平面变化的影响区域之外形成(图 1)。在这种情况下, 层序地层单元和边界面的命名不再与海岸线轨迹或相对海(湖)平面变化相联系 (Catuneanu, 2019)。

在上游控制区, 层序地层学定义是根据地

层层序中的主导沉积元素来确定的。在河流体系中, 河道合并的程度(即合并河道沉积与以泛滥平原为主的沉积交替出现)是定义上游控制区层序构型的关键 (Shanley and McCabe, 1994; Boyd *et al.*, 2000)。河道和泛滥平原要素之比由泛滥平原加积速率、河道限制程度和决口频率决定 (Bristow and Best, 1993)。这些过程反映了河流沉积的所有控制因素的相互作用, 包括可容空间、气候、源区构造作用以及影响沉积物分布的自旋回成因过程。

早期关于河流体系叠置样式的研究, 假定可容空间与河道合并程度之间存在直接联系, 即合并河道被解释为“低可容空间”条件的产物, 而以泛滥平原为主的河流沉积被解释为“高可容空间”条件的产物, 体系域的术语只涉及可容空间条件, 即“低可容空间体系域”与“高可容空间体系域”

(Boyd *et al.*, 2000; Leckie and Boyd, 2003)。这种命名现在看来可能过于简化, 虽然可容空间很重要, 但它不是形成地层叠置样式的唯一控制因素 (Bristow and Best, 1993; Catuneanu, 2017)。考虑到多种可能控制因素, Catuneanu (2017) 建议使用高合并 (河道沉积为主) 体系域和低合并 (泛滥平原沉积为主) 体系域, 对应的英文分别是 high-amalgamation systems tract 和 low-amalgamation systems tract (图 2)。

高合并体系域及叠置样式形成条件包括低沉积速率的泛滥平原加积作用、高能量的不受限的河流、高频率河道决口 (Bristow and Best, 1993)。在不同级别的地层旋回中, 可以观察到不同尺度的高合并叠置样式。有利于河道合并的因素包括: (1) 低沉积速率的泛滥平原加积作用; (2) 高沉积物供给、波动流量和倾向方向的幕式变化 (均有利于决口); (3) 陡峭的地形梯度也会促进不受限河道的发育 (Catuneanu, 2017)。

低合并体系域及叠置样式形成条件包括高沉积速率的泛滥平原加积作用、决口频率低、地形梯度低, 这些因素都使得低能量受限河道的横向移动能力降低 (Bristow and Best, 1993)。在高的泛滥平原加积速率和低的决口频率的条件下, 河流体系则发育侧向移动能力有限的受限制河道, 常见于河流沉积层序的上部 (Catuneanu, 2017)。

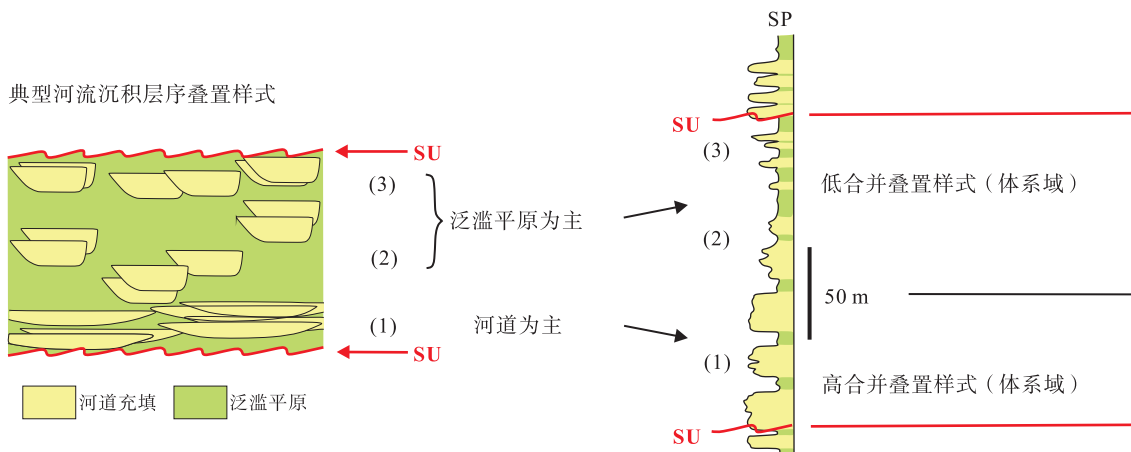
在不同级别的地层旋回中, 可以观察到不同尺

度的低合并叠置样式。较低等级层序中高低合并叠置样式之间的比率定义了较高等级的体系域。例如, 以高河道合并为主的一组四级层序限定了三级“高合并”体系域, 而以泛滥平原沉积为主的一组四级层序限定了三级“低合并”体系域。值得注意的是, 2 个尺度的层序都以高合并开始, 然后是低合并叠置样式, 这反映了在 2 个尺度上观测到的河流能量向上呈降低趋势。

1.2 国内层序构型研究现状

1.2.1 层序构型研究概况

在不同类型的陆相湖盆层序地层学研究过程中, 国内学者为了表征 Vail 经典层序地层模式以及其他层序地层学模式, 需要总结出层序内部的体系域构成特征, 因此经常应用到“层序构型”这一概念 (谢晓军和邓宏文, 2008; 高阳东等, 2021; 徐东浩等, 2024)。胡受权 (1998) 在泌阳断陷湖盆层序构型研究时, 用到“体系域构型”一词, 后来有学者研究沾化凹陷湖泊沉积层序的成因和构型特征时, 划分出 5 种层序构型, 包括冲积—河湖型、(半) 盐湖—淡水湖泊过渡型、海泛—深湖型、半深湖—缓坡型、河流—冲积平原型 (李继红等, 2002)。济阳拗陷新近系层序构型以发育冲积河流相沉积为特征, 其中河流相地层的体系域构型包括低位体系域、扩张体系域、高位体系域和收缩体系域 (国景星和刘媛, 2008)。松辽盆地下白垩统层序构型受裂谷盆地构造控制, 发育断



(1) 高能的不受限制的河道, 发育于低沉积速率的泛滥平原环境; (2) 低能受限河道和河漫滩, 发育于高沉积速率的泛滥平原环境; (3) 低能受限河道和泛滥平原, 发育于低沉积速率的泛滥平原环境。单元 (3) 包括河流系统能量最低的阶段, 因此发育河流序列中粒度最细的河道填充物, 由于顶部陆上不整合面的发育, 其保存潜力最低。SU—陆上不整合; SP—自然电位曲线

图 2 河流层序的常见层序构型 (据 Catuneanu, 2019; Elsevier 许可证号: 5932320989344)

Fig. 2 Common sequence architectures of fluvial sequences (after Catuneanu, 2019; with permission from Elsevier: 5932320989344)

陷型、断拗转换型和拗陷型 3 种类型层序构型 (李树青等, 2007)。渤海湾盆地霸县凹陷古近系陆相层序亦受裂谷背景影响, 发育断层坡折型、断层台阶坡折型、断层陡坡—缓坡型和斜坡—弯曲型 4 种层序构型 (Zhang *et al.*, 2020; 张自力等, 2023)。对于前陆湖盆地层构型, 纪友亮和周勇 (2020) 总结出在前陆湖盆山前带层序叠置呈加积或退积结构, 发育进积准层序组, 而在前陆湖盆斜坡带层序则叠置成退积结构, 早期发育退积式准层序组, 后期发育进积式准层序组。

1.2.2 典型“层序构型”模式

尽管在不同的文献里, 不同学者都在使用“层序构型”这个概念, 但均没有给出具体的涵义, 为了更好地指导储集层和烃源岩预测, 朱红涛等 (2012) 提出了层序构型的明确概念、类型及其意义。层序构型是指三级层序内不同体系域地层单元时间—空间组成配置关系, 可分为 L 型、T 型、TH 型、H 型 (E-H 型和 L-H 型) 4 种类型 (朱红涛等, 2012), 其中 H 型又可细分为早期高位体系域为主的 E-H 型和晚期高位体系域为主的 L-H 型 (图 3)。层序构型可以从地层厚度和层序地层单元空间迁移、叠置特征 2 个方面来表征体系域的时空配置关系, L 型层序以 LST (低位体系域) 地层厚度为主, TST (水进体系域) 和 HST (高位体系域) 厚度相对比较薄甚至不发育; T 型层序以 TST 为主, LST 和 HST 厚度相对比较薄甚至不发育; TH 型层序 TST 和 HST 厚度相当, LST 相对不

发育; H 型层序以 HST 为主, LST 和 TST 厚度相对比较薄甚至不发育; 对于表征体系域地层单元的空间配置而言, 从 L-H 型层序构型则表示出体系域单元在叠置关系、空间分布及其迁移性特征。一般情况下, L 型层序分布范围局限, 呈进积或加积叠置; T 型层序分布范围增大, 呈退积叠置; H 型层序分布范围再次减小, 呈进积叠置。在未来的研究中, 可以区分出依赖海平面变化的下游控制区和不依赖海平面变化的上游控制区, 进行层序构型的进一步划分。

2 陆相层序模拟研究进展及现状

对于层序模拟, 其先经历了以“水槽实验”为支撑的物理模拟阶段, 随着数学理论及计算机技术的不断发展, 计算机数值模拟逐渐兴起。数值模拟已经成为当今地球科学研究的重要手段, 相比较传统的方法, 它在克服地学研究中大尺度、长时间复杂问题上有显著的优势 (吴恒, 2020)。同时, 数值模拟是定量研究层序地层几何形态和层序组成单元的叠置模式、了解沉积过程和盆地充填史、直观预测沉积相时空分布的有力工具 (Zhu *et al.*, 2013)。对于层序的数值模拟, 已经趋向于成熟, 尤其是正演模拟。正演模拟涉及一系列关于泥沙搬运模式的假设 (例如, 几何模式、扩散模式或基于过程模式), 以及测试控制对层序发展的影响 (例如, 浮升、下沉、泥沙供应) 等已经逐步成熟。近年来, 不少国内外学者在陆相湖盆层序的研

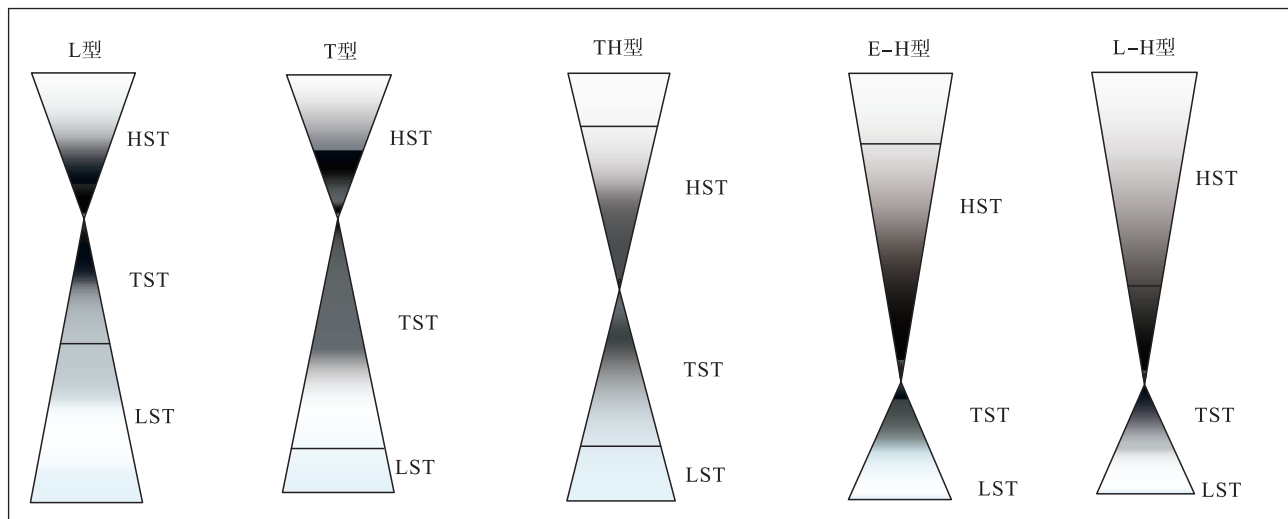


图 3 层序构型的类型 (据朱红涛等, 2012)

Fig. 3 Types of sequence architecture (after Zhu *et al.*, 2012)

究中也应用了数值模拟方法（朱红涛等，2007；林畅松等，2010；Catuneanu and Zecchin, 2016）。

2.1 水槽模拟

对于陆相湖盆的地层沉积模拟研究，最初是从水槽实验开始的。沉积模拟实验的研究历程大概可分为探索阶段、快速发展阶段和沉积学定量模拟阶段。

2.1.1 探索阶段

19 世纪末至 20 世纪 50 年代，沉积模拟处于方法探索阶段，受当时的理论水平和实验条件的限制，主要是以现象的观察和描述为主。1894 年，Deacon (1894) 首次在一条玻璃水槽中观察到泥沙运动形成波痕，并对其进行了描述。1914 年，Gilbert 第 1 次用各种粒径的砂在不同的水流强度下进行了水槽实验，较详细地观察和描述了一系列沉积构造特征，并且其描述的“砂丘”后来被其他的研究者命名为不对称波痕（李趁义，2005）。在此之后，许多学者在 20 世纪 40—50 年代完成了一些开拓性的实验，并建立实验沉积学的一些基本方法。此阶段实验内容总体比较简单，主要以实验现象的观察和描述为主，缺乏理论的分析 and 指导。

2.1.2 快速发展阶段

20 世纪 60 年代至 70 年代，属于沉积模拟实验的大发展阶段，这一阶段以水槽实验为主，重视沉积构造形成机理的定性研究。Schumm 和 Khan (1971) 用水槽实验研究了凹凸不平的河床对流量变化的影响，Costello 和 Southaud (1981) 进行了从波纹到下部平坦床沙的实验，研究了下部流态的沉积几何形态、迁移规律及相应的水动力特征，用水槽实验模拟爬升沙纹层理的沉积特征，应用水深和平均速度来表征在松散泥沙河床的明渠均匀流中的床面形态。70 年代后的模拟实验已不再局限于单向水动力条件的模拟和沉积构造的解释，开始进行大型盆地模拟和沉积学的定量研究，例如 Mosely 进行的河道交汇处的实验研究，Scott 模拟了辫状河叶状沙坝的形成。这一阶段还有浊流模拟实验（Middleton, 1966）、风洞模拟实验（Mckee *et al.*, 1971）、风暴模拟实验等。所有这些模拟实验都促进了沉积学理论的发展，对油气勘探开发具有重要的实际意义。

2.1.3 沉积学定量模拟阶段

自 20 世纪 80 年代开始，沉积模拟进入了以砂

体形成过程和演化规律为主要研究内容的湖盆砂体模拟阶段。该阶段的沉积模拟更注重实际问题的解决，沉积模拟开始由定性转向定量，由小水槽实验转向大型盆地模拟。这期间对不稳定条件下的底形规模的变化以及底负载对均流和紊流性质的影响等，均有了较为深入的了解（Wijbenga and Klaassen, 1983；Carbonneau and Bergeron, 2000）。

随着水槽实验沉积模拟的不断发展，在国内也有许多学者相继进行了相关的实验模拟。20 世纪 70 年代末，在长春地质学院建立了第 1 个用于沉积研究的小型玻璃水槽，主要研究底形的形成与发展。20 世纪 80 年代，中国科学院地质研究所开展小型水槽实验。到 1988 年，江汉石油学院成立湖盆沉积模拟实验室，相继展开了许多沉积模拟，如：入湖单砂体形成机理模拟、小型曲流入湖三角洲模拟、辫状河三角洲模拟、辫状河三角洲形成及演化模拟、扇三角洲及水下扇模拟、湖滩砂沉积模拟等，取得了大量的研究成果及认识（李趁义，2005）。1994 年，刘忠保和赖志云（1994）对长江中游松滋口三角洲沉积进行了实验模拟，并识别出燕尾式和先主流后分流自平衡调整式 2 种加积方式；1995 年，刘忠保等（1995）还模拟了湖泊三角洲砂体的湖退沉积过程，对实验过程中三角洲砂体的形成、主水流和三角洲砂体的迁移作了详细描述，并定量研究了不同湖水深度下洪水、中水和枯水对砂体的改造，最后认为湖水深度控制着三角洲砂体的形态和进积速率，洪水对三角洲砂体的控制起了决定性作用。2002 年，张春生等（2002）用实验模拟了涌流型浊流的形成和发展，对涌流型浊流及底流型浊流的动量方程进行了比较，发现涌流型浊流不仅从其前部卷吸水体，同时从其顶面卷吸水体。

2.2 层序数值模拟

2.2.1 层序数值模拟概述

数值模拟早期最先用于油气藏勘探开发方面，自 1970 年将油藏数值模拟结果作为油气田一次、二次开发必备的基础资料开始（Harris, 1975），地质学家就对地质建模给予了特别关注，尤其是在模型定量描述方法上。Dubrule (1986) 介绍了地质模型的重要属性——渗透率的地质统计学算法，有力地推动了地质模型向油藏模型的转换，提高了油藏数值模拟预测的准确性；Journel (1994) 讨论

了序贯模拟、误差模拟、概率场模拟、矩阵分解、模拟退火等不同的模拟算法,从实用角度入手,综合考虑模型和算法,将随机模型进行了综合分类。20世纪80年代提出层序地层学概念后,很多学者都利用数值模拟研究层序演化规律(Liu *et al.*, 1998; Burgess, 2001)。

2.2.2 国外层序数值模拟研究进展及现状

随着不断的发展和完善,数值模拟方法在各行各业都得到了广泛应用。对于层序地层的模拟研究也不例外。

层序数值模拟的萌芽始于1966年斯坦福大学 Harbaugh 建立的首个沉积模拟系统,当时主要是针对地质系统提出的概念模型具有非定量、静态、概念性等特征,初步实现将地质过程转化为计算机代码,对海岸沉积进行模拟(Harbaugh, 1966)。紧接着,随着地震地层学理论的提出,该理论以地震资料为核心解释地层的形成过程,为盆地尺度上的沉积正演模拟提供了依据(Vail *et al.*, 1977),该阶段更重视参数具体化、过程—响应关系公式化等,特别是借助运算功能强大的计算机系统,采用定量、预测或推导的方式建立地质系统的数字响应特征, Helland-Hansen 等(1988)建立起以地震层序界面为核心的层序模拟软件,由此拉开层序数值模拟的序幕。1989年,斯坦福大学沉积模拟团队联合多家石油公司和苹果、IBM 等公司,共同研发了基于流体动力学的沉积模拟软件——SEDSIM (Tetzlaff and Harbaugh, 1989),标志着沉积正演数值模拟从层序地层模拟走向沉积颗粒的沉积过程模拟,具有里程碑的意义。

20世纪90年代,地层沉积正演模拟开始进入快速发展阶段,该阶段研发的沉积正演数值模拟逐渐从二维到三维,更加注重沉积的三维模拟应用(Lorenz, 1993)、沉积内部结构的模拟及计算方法,计算精度也取得显著提升,其中计算方法大致分为基于扩散方程与基于水动力方程两大类,其中扩散方程以河流、三角洲环境应用最为普遍(Jordan and Flemings, 1991)。1999年, Cross 和 Lessenger (1999)提出基于正演的沉积模拟方法,该方法包括地层正演模拟、观测数据与模拟结果比较及全局参数优化算法,并实现了碳酸盐沉积二维模拟,为沉积模拟走向工业化应用奠定了基础。

20世纪末至21世纪初,层序数值模拟进入了

全面深化发展时期,国外学者 Cross、Granjeon 及 Burgess 等最先进行了层序相关的数值模拟(Cross and Lessenger, 1999; Granjeon and Joseph, 1999; Burgess, 2001),以 Burgess 为代表的一批学者先后进行了许多关于层序地层的正演模拟,通过新一代三维地层建模进行了多元层序地层的正演模拟,提出相对海平面变化、陆架宽度和沉积物搬运速率是深海地层体积时空分布的重要控制因素(Burgess *et al.*, 2006),注意到反向海岸线轨迹可能是区分强制性海退和非强制性海退的更可靠方法(Prince and Burgess, 2013)。后来, Burgess (2016)基于2个计算度量,即从垂直相序列分析得出的马尔科夫度量 m 和从地层单元观测厚度分析得出的运行度量 r ,从而通过定量分析更好地理解有序或无序地层。Zhang 等(2019)通过采用数值地层正演模拟方法,比较了由相对海平面循环变化引起的地层几何形状与由输沙量和水量变化引起的地层几何形状,证明了沉积物供给亦是主导地层层序的主要因素,从而为层序地层构型分析提供了理论支撑。

2.2.3 国内层序数值模拟研究进展及现状

随着层序数值模拟方法在国际上的广泛应用,国内学者也针对中国陆相湖盆层序展开了数值模拟研究(林承焰等, 2023)。胡受权(2000)利用数值模拟分析了湖平面变化及物源供给对陆相层序的影响,郑荣才等(2009)应用序贯指示模拟法对鄂尔多斯盆地长北气田山西组2段陆相层序地层的砂体分布进行了数值模拟研究, Zhu 等(2013)采用二维模拟软件(SEDPAK)和三维模拟软件(SEDSIM)模拟克拉通内盆地沉积对层序地层构型的控制作用,获得了克拉通盆地沉积物供给与地层发育之间的关系,模拟结果对于解释克拉通盆地层序地层格架和层序叠置样式、预测潜在储集层砂体的分布具有重要意义。吴恒(2020)通过建立起“耦合构造—层序数值模型”,展现了陆相层序样式在三维空间上的多变性,突破了传统的二维模拟解释。杜威等(2020)选择 Delft3D 和 DIONISOS 模型,对不同沉积尺度下的陆相层序进行了正演模拟,使得层序演化的动态过程得以明晰,同时可结合地震沉积学方法和地质建模算法重建岩相古地理分布。张威等(2022)利用 DIONISOS 三维地层模拟软件系统,对珠江口盆地古近系文昌组层

序地层开展数值模拟，阐明了 A/S（可容空间/沉积物供给）对湖盆三角洲演化的控制机制。

国内外学者应用数学方程理论及计算机科学技术，使得“层序”的发展趋于数据化、数值化、相对标准化，使得层序地层学在陆相盆地的应用研究中变得更加精确、动态化、可视化，可信度更高。

2.3 层序数值模拟方法及其应用

关于层序地层的数值模拟方法，随着“数值模拟技术”的发展也日趋完善、丰富，对不同地区的层序地层采用不同的模拟方法，是选择合适数值模拟方法的关键，将举以下 5 个例子介绍 5 种数值模拟方法。

2.3.1 SEDPAK 正演模拟

SEDPAK 是美国南卡罗莱纳大学地层模拟小组开发的最早正演模拟软件之一，该软件基于控制沉积地层层序和叠置样式的几何规则，通过可视化层序边界之间产生的地层几何形状，为模拟盆地的沉积充填提供了一个概念框架，主要用于证实对盆地内油气圈闭和聚集潜力的推断，旨在模拟和重建碎屑和碳酸盐沉积物的几何形状，这些几何形状是由于构造运动及沉积速率变化等产生的。该软件可以模拟盆地沉积充填体的演化过程，定义这些沉积物沉积的年代地层格架，并说明在岩心、露头、钻井和地震数据中看到的层序和体系域之间的关系。该软件通过考虑沉积物供给、海平面变化、构造沉降、盆地几何形态等 4 个主要地质参数来模拟泥沙沉积的 2D 几何形状（Strobel *et al.*, 1989）。该软件模拟的步骤：第 1 步是了解盆地的初始沉积条件，包括古地形、水深、气候、基准面变化和沉积物输入等基本条件；第 2 步是根据该软件考虑的 4 个参数进行模拟；第 3 步是根据模拟结果与盆地初始的一些情况进行参数调整、验证模拟结果；第 4 步是多次模拟进行最终可靠性结果的选择。该软件已被证明在补充定性地质解释和验证地质模型方面比较有效。此外，该软件还能直观地模拟盆地充填过程。

2.3.2 SEDSIM 正演模拟

SEDSIM 是一个三维地层正演模拟程序，最初于 20 世纪 80 年代由斯坦福大学开发，1997 年由澳大利亚的 Cedric Griffiths 博士团队进行了大量修改和改进（Griffiths *et al.*, 2001）。该方法通过重

建沉积、侵蚀和再沉积的物理过程，来确定沉积物在时空上的变化，其能在较大时空尺度上进行层序数值模拟。SEDSIM 项目的核心是水动力和沉积模拟。该模拟所需要考虑的因素包括沉降、基准面变化、波浪传输、压实和边坡破坏（Tetzlaff and Harbaugh, 1989; Griffiths *et al.*, 2001）。具体模拟步骤与 SEDPAK 正演模拟相似，不同的是 SEDSIM 模拟软件是 3D 模拟，而 SEDPAK 是 2D 模拟。该方法同样也在补充定性地质解释和验证地质模型方面是有用的，也能更加直观地模拟盆地充填过程。

应用 SEDPAK 和 SEDSIM 这 2 种计算机程序对层序进行模拟，可以具体得出（Zhu *et al.*, 2013）：（1）建立高分辨率层序地层模型，以指导地震解释和井间对比；（2）观测到的旋回层序的模拟；（3）克拉通盆地内沉积堆积对完整旋回发育过程中层序地层构型的控制作用。

2.3.3 基于 Delft3D 模型的三维正演模拟

Delft3D 模型以 Navier-Stokes 方程为基础，依据质量守恒原理和沉积物“搬运—沉积—侵蚀”方程，从而实现重建沉积物搬运和沉积过程的三维模拟，该模拟采用逐步迭代的计算方式进行，步骤包括：①输入/更新边界条件→②输入/更新沉积底形→③流动方程求解→④沉积物搬运、沉积及剥蚀量计算→⑤底形高程变化计算（冯文杰等，2017）。该模型能够较准确地模拟出河道内部沙坝的形成和改造、河流的决口和洪泛平原的形成、河流一波浪—潮汐作用控制下的河口系统。模拟结果可为陆相层序内的各沉积单元提供较为准确及清晰的形态，并恢复其形成过程（杜威等，2020）。

2.3.4 基于 DIONISOS 模型的三维正演模拟

DIONISOS 模型利用 Fick 第二定律，即沉积物搬运的扩散方程（Harbaugh and Bonham-Carter, 1970）描述每一种沉积物组分分布和主控因素随时间变化的规律，需考虑的因素有：流体能量、驱动机制、时间尺度、气候变化和地形坡度等。该模型可模拟盆地每个时空节点的沉积和剥蚀作用，从而实现陆相盆地层序充填样式和沉积体系形态的三维定量表征（徐伟等，2019）。

2.3.5 基于 N-S 方程的层序数值模拟

N-S 方程是描述液体和空气等流体物质的一组方程。这些方程建立了粒子动量（力）的变化率、流体中的压力与耗散的黏性力（类似于摩擦）之

间的相互作用以及重力之间的关系。N-S 方程包含了流体运动的所有信息，但该方程没有解析解。在大空间和时间尺度下，即使数值解很难得到，也需要对方程进行简化 (Burgess and Allen, 2014)。

在 N-S 方程的基础上,利用物质守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程来模拟水动力随时间的变化,以研究相对海平面变化下层序地层的沉积特征。该方法利用沉积物搬运、沉积以及剥蚀方程来求解,从而实现沉积过程的数值模拟 (Kaufman, 1994)。运用该方法进行模拟的具体步骤为: (1) 收集并整理“泥沙流量、流速”等资料; (2) 采用单因素方法设计模拟实验,设置仿真条件; (3) 建立水位上升、水位下降、水位先上升后下降、水位先下降后上升 4 种模型; (4) 对上述 4

种模型进行数值模拟分析,得出模拟结果; (5) 将模拟结果与前人研究等进行对比评估,得出结论 (Song *et al.*, 2020)。

2.3.6 各数值模拟方法及其应用

主要以上述 5 种层序数值模拟方法为例,介绍了各数值模拟方法在层序地层学领域的应用情况,并对上述 5 种层序数值模拟方法的原理、模拟步骤、优缺点及应用实例作了总结(表 1)。

3 陆相层序构型与数值模拟应用

近年来,随着层序地层学不断发展,陆相湖盆层序构型及数值模拟应用越来越广泛,尤其是对陆相盆地的砂体分布 (郑荣才等, 2009)、层序叠置

表 1 不同层序数值模拟方法及其应用实例

Table 1 Different numerical simulation methods of sequence and their application examples

层序数值模拟方法	模拟原理(步骤)	优缺点	应用实例
SEDPAK 正演模拟	基于层序地层学及几何学原理,涉及 4 个参数为:盆地地貌、沉积物供给速率、基准面波动和构造运动,详见 2.3.1 (Kendall, 1991; Strobel <i>et al.</i> , 1989) (http://sedpak.geol.sc.edu/)	优点:实现对沉积层序的各种地质参数的定量评价,是直观认识沉积过程和盆地演化的有效工具;缺点:局限于沉积盆地形态的 2D 层面,未实现沉积盆地空间—时间上的 3D 充填过程模拟	鄂尔多斯盆地二叠系山西组下段层序数值模拟 (Zhu <i>et al.</i> , 2013); 模拟出 280~270 Ma 高分辨率层序地层格架内各三级层序的叠置样式及演化过程 (加积—前积—退积—前积—退积—进积)
SEDSIM 正演模拟	基于层序地层学及几何学原理,重建沉积、侵蚀和再加工沉积物的物理过程来确定沉积物在时间和空间上的变化,步骤与 SEDPAK 正演模拟类似 (http://www.csiro.au/products/SedSim)	优点:实现对沉积层序的各种地质参数的定量评价,及其能在很大的空间和时间尺度上进行沉积盆地 3D 充填过程模拟 (Tetzlaff and Harbaugh, 1989)	
基于 Delft3D 模型的三维正演模拟	基于质量守恒原理及 Navier-Stokes 方程,结合沉积物“搬运—沉积—侵蚀方程”,重建沉积物搬运和沉积过程的三维模拟。具体步骤:①输入/更新边界条件→②输入/更新沉积底形→③流动方程求解→④沉积物搬运、沉积及剥蚀量计算→⑤底形高程变化计算	优点:实现“事件尺度”内的形态模拟,如河道进积侵蚀河口坝(坝上河)、河道决口—改道废弃、河道内充填和三角洲最终形态;缺点:无法展现如分流河道等的侧向侵蚀及加积模拟,需借助实例,此外该模型无法模拟“砾质河流—三角洲”型事件模拟	以浅水三角洲为例,以古环境恢复为依托,利用 Delft3D 模型再现五级层序 1 个半旋回内稳定湖平面或高频湖平面变化下河道—河口坝复合砂体的形成过程 (杜威等, 2020)
基于 DIONISOS 模型的三维正演模拟	基于质量守恒原理及 Fick 第二定律 (Harbaugh and Bonham-Carter, 1970),在时间尺度大于 1 ka 且网格规模大于 1 km 条件下,描述每一种沉积物组分分布和主控因素随时间变化的规律,模拟盆地每个时空节点的沉积和剥蚀作用,实现盆地层序充填样式和沉积体系形态的三维定量表征	优点:实现“盆地尺度”内的形态 3D 数值模拟,即实现盆地层序充填样式和沉积体系形态的三维定量表征;缺点:①模拟参数的确定受人为因素影响;②盆地构造特征很大程度上限制了模拟参数的确定;③受网格规模的限制,层序模型仅能够反映沉积相和亚相级别的岩相分布,无法精确到微相级别;④模型仅考虑原始沉积组构,未考虑储集层的成岩用	以浅水三角洲为例,利用 DIONISOS 模型重建三级—四级层序格架内的岩相展布,建立盆地尺度下湖盆层序演化与构型尺度下沉积体系发育过程的关系 (杜威等, 2020)
基于 N-S 方程的层序数值模拟	基于 N-S 方程 (Kaufman, 1994),利用物质守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程来模拟水动力随时间的变化,主要利用沉积物运移方程、沉积方程及剥蚀方程来求解沉积物运移和沉积,得出各阶段 (LST、TST、HST) 的沉积情况,从而实现沉积过程的数值模拟。具体模拟方法参见本文 2.3.5	优点:能非常准确地模拟出“水位上升、水位下降、水位先上升后下降、水位先下降后上升”这 4 种模型的沉积过程及相应特征,实现对沉积及过程进行数值模拟。缺点: N-S 方程包含了流体运动的所有信息,但方程没有解析解。在大的空间和时间尺度下,既使难以获得数值解,因此也有必要对方程进行简化,这是该方法的一个局限 (Burgess and Allen, 2014)	沉积数值模拟在层序地层学研究中的应用 (Song <i>et al.</i> , 2020),通过模拟实验,其验证了相对海平面变化是层序变化的主要因素,并模拟出各阶段 (LST、TST、HST) 的沉积过程

样式 (Zhu *et al.*, 2013)、不同尺度下的层序演化 (杜威等, 2020) 等方面的数值模拟应用研究, 为油气勘探开发提供理论基础, 在油气勘探开发领域应用广泛。

沉积层序数值模拟最早应用于油气田的砂岩储集层预测, 随着陆相沉积层序的不断发展和计算机技术的不断进步, 数值模拟在油气勘探开发领域应用更加广泛, 同时也使得油气田的储集层预测更加精准、与生产结合更加紧密。

胡受权 (2000) 基于 Waltham (1992) 提出的层序地层模拟方程, 综合考虑了陆源碎屑物供给、内源碳酸盐沉积、沉积物侵蚀与再沉积、重力流沉积、构造升降以及水平位移等多种因素, 对泌阳断陷双河—赵凹地区进行层序数值模拟, 对研究区的储集层发育做相对准确预测。纪友亮等 (2008) 在对断陷盆地油气聚集与陆相层序构型之间的关系研究时, 通过层序数值模拟提出各级层序的油气汇聚规模以及勘探对策, 成功指导沾化凹陷油气勘探。朱红涛等 (2012) 建立了陆相湖盆“L 型、T 型、TH 型、H 型 (E-H 型和 L-H 型)”层序构型及其与岩性关系, 预测珠江口盆地惠州凹陷的砂体储集层分布, 提出惠州凹陷南缘主要为 T 型层序, 烃源岩相对发育, 北缘主要为 H 型层序, 储集层相对发育。Zhu 等 (2013) 对“鄂尔多斯盆地二叠系山西组下段”进行层序数值模拟, 模拟出 280~270 Ma 的高分辨率层序地层格架内各三级层序的叠置样式及演化过程 (加积—前积—退积—前积—退积—进积), 为该盆地的油气进一步勘探开发奠定了理论基础。贺婷婷等 (2018) 应用沉积正演数值模拟技术对塔河油田 T 区三角洲沉积过程进行了模拟, 对三角洲砂体展布规律进行了预测。熊天鹤 (2018) 应用 DIONISOS 软件对海拉尔盆地贝尔—乌尔逊凹陷大磨拐河组泥质三角洲的沉积过程进行沉积数值模拟, 提出沉积供给物源泥质含量越高, 三角洲泥质前积体越发育, 前积体范围越广泛, 三角洲泥质沉积物可能是重要的烃源岩。杜威等 (2020) 在对不同沉积过程尺度下正演模拟的研究时, 应用相关沉积数值模型对陆相不同次级湖平面变化对浅水湖盆砂体的控制进行了模拟, 并利用相关模型的正演模拟成功对陆相湖盆进行了三维地质建模。

如今随着现代油藏管理水平的逐步提升, 越来

越多的含油气盆地正应用三维层序数值模拟进行相关应用分析, 数值模拟亦需建立起更加精准、时效性高的三维地质模型。未来陆相层序数值模拟在油田的应用也会越来越广泛, 也是未来智能油田实现必不可缺的核心技术之一 (张文彪等, 2019)。

4 陆相层序构型及沉积模拟研究展望

1) 层序地层学理论起源于被动大陆边缘盆地, 在发展和推广应用过程中, 产生了不同学派和不同层序构型, 层序地层学在中国多种类型陆相盆地得到了广泛应用, 有效地指导了能源矿产勘探和开发。陆相湖盆层序地层学未来研究应重点关注不同类型陆相盆地层序地层构型、层序沉积过程与数值模拟、层序构型与矿产资源预测等发展方向。

2) 层序构型在上游控制区明显不同于下游控制区, 所以在未来的物理模拟及数值模拟的参数选择中, 需要区别对待。在下游控制区依赖于相对海 (湖) 平面变化的背景下, 可容空间变化可能起到关键作用, 但是在上游控制区不依赖于相对海 (湖) 平面变化的背景下, 受古构造和古气候双重控制的沉积物供给可能是需要重点考虑的参数。

3) 随着层序数值模拟方法的发展, 针对陆相层序, 未来应在更大尺度上对沉积盆地进行建模研究, 特别是在“源—汇系统”框架下, 将数值模拟的范围扩大到更大的尺度, 通过调节泥沙产生量与连接源区和沉积中心的输送系统等, 在不同尺度范围模拟沉积物供给对陆相湖盆层序构型的控制。

4) 对于高精度定量层序建模方法的开发将会成为一种趋势, 在保证研究结果精确可靠的前提下, 应将数值模拟方法应用于更多类型盆地, 如克拉通盆地、裂谷盆地、前陆盆地等, 分析不同类型盆地沉积供给变化特征及其与可容空间的匹配关系, 分析各类模拟方法的优点及局限性, 提出有针对性的模拟方法。

5) 沉积正演模拟与多点地质统计学相结合, 即综合沉积正演模拟以及地质学统计学各自的优势, 通过算法融合或者采用分级建模的思路进行技术融合, 也是陆相层序数值模拟未来发展的方向之一。

6) 随着数据时代的到来, 露头、岩心、地球物理、地球化学、古生物等多维度的资料应与层序地层建模密切联系, 基于大数据和人工智能的深度

学习和强化学习模型,是层序数值模拟的发展趋势。

致谢 纪友亮教授和吴因业教授审阅了论文初稿,并提出宝贵修改意见,作者在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- 邓宏文,王红亮,王居峰,谢晓军,苏宗富,尚尔杰. 2004. 层序地层成与层序控砂、控藏的自相似特征:以三角洲—浊积扇体系为例. 石油与天然气地质,25(5): 491-495. [Deng H W, Wang H L, Wang J F, Xie X J, Su Z F, Shang E J. 2004. Self-similarity of constitution of sequence stratigraphy and distribution of sandbodies and lithologic reservoirs: taking delta-turbidite fan system as an example. *Oil & Gas Geology*, 25(5): 491-495]
- 杜威,纪友亮,李其海,王子涵,席家辉,唐林,高星星. 2020. 不同沉积过程尺度下正演数值模拟研究进展及油气地质意义. 油气地质与采收率,27(2): 62-71. [Du W, Ji Y L, Li Q H, Wang Z H, Xi J H, Tang L, Gao X X. 2020. Sedimentary forward numerical modeling at different sedimentary scales: progress and hydrocarbon significance. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 27(2): 62-71]
- 冯文杰,吴胜和,张可,赵文凯,贾凤娟. 2017. 曲流河浅水三角洲沉积过程与沉积模式探讨:沉积过程数值模拟与现代沉积分析的启示. 地质学报,91(9): 2047-2064. [Feng W J, Wu S H, Zhang K, Zhao W K, Jia F J. 2017. Depositional process and sedimentary model of meandering-river shallow delta: insights from numerical simulation and modern deposition. *Acta Geologica Sinica*, 91(9): 2047-2064]
- 高阳东,张向涛,李智高,丁琳,李小平. 2021. 珠江口盆地恩平凹陷北带下一中中新统层序构型及其差异性分析:对岩性圈闭发育的启示. 地球科学,46(5): 1758-1770. [Gao Y D, Zhang X T, Li Z G, Ding L, Li X P. 2021. Variability in sequence stratigraphic architectures of the Lower-Middle Miocene Pearl River Delta, northern Enping sag, Pearl River Mouth Basin: implications for lithological trap development. *Earth Science*, 46(5): 1758-1770]
- 国景星,刘媛. 2008. 济阳拗陷新近系层序地层构型. 中国石油大学学报(自然科学版),32(1): 1-4. [Guo J X, Liu Y. 2008. Model of sequence stratum of Neogene of Jiyang depression. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 32(1): 1-4]
- 贺婷婷,段太忠,赵磊. 2018. 塔河油田 T 区三叠系三角洲砂体沉积过程数值模拟. 见:第十五届全国古地理学及沉积学学术会议摘要集,2. [He T T, Duan T Z, Zhao L. 2018. Numerical simulation of sedimentary process of Triassic delta sand body in T block of Tahe Oilfield. In: Abstracts of the 15th National Conference on Palaeogeography and Sedimentology, 2]
- 胡受权. 1998. 断陷湖盆陆相层序中体系域构型及其模式新论. 西安石油学院学报(自然科学版),13(6): 7-13,17. [Hu S Q. 1998. On the structure and mode of the system tracts of a continental sequence in faulted lake basin. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 13(6): 7-13,17]
- 胡受权. 2000. 湖平面变化及物源供给对陆相层序影响机理的计算机模拟. 断块油气田,7(6): 1-4. [Hu S Q. 2000. Computer simulation on influencing mechanism of lacustrine level change and sedimentary source recharge in terrigenous sequence. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 7(6): 1-4]
- 纪友亮,周勇. 2020. 层序地层学. 北京:中国石化出版社,267. [Ji Y L, Zhou Y. 2020. *Sequence Stratigraphy*. Beijing: China Petrochemical Press, 267]
- 纪友亮,张善文,王永诗,黄建军. 2008. 断陷盆地油气汇聚体系与层序地层格架之间的关系研究. 沉积学报,26(4): 617-623. [Ji Y L, Zhang S W, Wang Y S, Huang J J. 2008. Study on the relationship between oil-gas convergence system and sequence stratigraphic framework in fault basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(4): 617-623]
- 纪友亮,曹瑞成,蒙启安,张革,渠永红. 2009. 塔木察格盆地塔南凹陷下白垩统层序结构特征及控制因素分析. 地质学报,83(6): 827-835. [Ji Y L, Cao R C, Meng Q A, Zhang G, Qu Y H. 2009. Analysis of sequence structure and its controlling factors in lower Cretaceous in Tanan Depression, Tamsag Basin. *Acta Geologica Sinica*, 83(6): 827-835]
- 姜在兴. 1996. 层序地层学原理及应用. 北京:石油工业出版社. [Jiang Z X. 1996. *Principles and Applications of Sequence Stratigraphy*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 姜在兴,向树安,陈秀艳,张锐锋. 2009. 淀南地区古近系沙河街组层序地层模式. 沉积学报,27(5): 931-938. [Jiang Z X, Xiang S A, Chen X Y, Zhang R F. 2009. The sequence stratigraphy model of Shahejie Formation in Diannan Area. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 931-938]
- 李趁义. 2005. 东营三角洲滑塌浊积岩形成机制与高频基准面旋回控砂模式研究. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Li C Y. 2005. Study on the forming mechanism of the slumped turbidite and the controlling sandbody model of high frequency base-level cycle of Dongying Delta. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 李继红,魏魁生,厉大亮,张守鹏,郝运轻,邱以刚. 2002. 非海相沉积层序的成因和构型特征. 沉积学报,20(3): 409-415. [Li J H, Wei Q S, Li D L, Zhang S P, Hao Y T, Qiu Y G. 2002. Genesis and configurational characteristics of non-marine sedimentary sequences. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(3): 409-415]
- 李树青,李和,徐伟,董志刚. 2007. 松辽盆地南部白垩统层序构型及沉积特征. 天然气工业,27(4): 36-39,150. [Li S Q, Li H, Xu W, Dong Z G. 2007. Sequence architectures and sedimentary features of Lower Cretaceous in the southern Songliao Basin. *Natural Gas Industry*, 27(4): 36-39,150]
- 林畅松,刘景彦,胡博. 2010. 构造活动盆地沉积层序形成过程模拟:以断陷和前陆盆地为例. 沉积学报,28(5): 868-874. [Lin C S,

- Liu J Y, Hu B. 2010. Computer simulation on the Formation of depositional sequences in tectonic active Basin; a case study on rift and foreland basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 868-874]
- 林承焰, 陈柄屹, 任丽华, 董春梅, 张宪国. 2023. 沉积数值模拟研究现状及实例. *地质学报*, 97(8): 2756-2773. [Lin C Y, Chen B Y, Ren L H, Dong C M, Zhang X G. 2023. A review of depositional numerical simulation and a case study. *Acta Geologica Sinica*, 97(8): 2756-2773]
- 刘忠保, 赖志云. 1994. 辫状河—扇三角洲形成及演变的水槽实验. *大庆石油地质与开发*, 13(2): 58-62, 77-78. [Liu Z B, Lai Z Y. 1994. A flume experiment on formation and evolution of braided stream-fan delta. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 13(2): 58-62, 77-78]
- 刘忠保, 赖志云, 汪崎生. 1995. 湖泊三角洲砂体形成及演变的水槽实验初步研究. *石油实验地质*, 17(1): 34-41. [Liu Z B, Lai Z Y, Wang Q S. 1995. Flume-experimental study on the formation and evolution of lake delta sandbody. *Petroleum Geology & Experiment*, 17(1): 34-41]
- 邵龙义, 徐小涛, 王帅, 王东东, 高迪, 王学天, 鲁静. 2021. 中国含煤岩系古地理及古环境演化研究进展. *古地理学报*, 23(1): 19-38. [Shao L Y, Xu X T, Wang S, Wang D D, Gao D, Wang X T, Lu J. 2021. Research progress of palaeogeography and palaeoenvironmental evolution of coal-bearing series in China. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(1): 19-38]
- 王华. 2008. 层序地层学基本原理、方法与应用. 北京: 北京大学出版社, 383. [Wang H. 2008. *Basic Principles, Methods, and Applications of Sequence Stratigraphy*. Beijing: Peking University Press, 383]
- 吴恒. 2020. 裂谷盆地构造沉积演化数值模拟及层序响应的综合研究. 中国石油大学(北京)博士学位论文. [Wu H. 2020. An integrated study of rift basin model and stratigraphic response to spatiotemporally varying tectonic forcing. Doctoral dissertation of China University of Petroleum (Beijing)]
- 谢晓军, 邓宏文. 2008. 霸县凹陷古近系层序地层构型. *岩性油气藏*, 20(2): 74-77, 118. [Xie X J, Deng H W. 2008. Paleogene sequence stratigraphic configuration in Baxian sag. *Lithologic Reservoirs*, 20(2): 74-77, 118]
- 熊天鹤. 2018. 泥质三角洲沉积特征及沉积过程模拟. 东北石油大学硕士学位论文. [Xiong T H. 2018. *Sedimentary characteristics and simulation of deposition process of the muddy delta*. Masteral dissertation of Northeast Petroleum University]
- 徐东浩, 秦兰芝, 李峻颖, 蔡坤, 谢晶晶. 2024. 西湖凹陷平北斜坡带平湖组层序构型差异及控砂模式. *地质科技通报*, 43(4): 154-166. [Xu D H, Qin L Z, Li J J, Cai K, Xie J J. 2024. Sequence stratigraphic architectures and sand-body distribution models of the Pinghu Formation in the Pingbei slope belt of the Xihu Depression. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 43(4): 154-166]
- 徐伟, 房磊, 张新叶, 王鹏飞, 杨希濮. 2019. 乌干达 K 油田扇三角洲沉积正演模拟与应用. *地球科学*, 44(2): 513-523. [Xu W, Fang L, Zhang X Y, Wang P F, Yang X P. 2019. Sedimentary forward simulation and application of fan delta in K Oil Field in Uganda. *Earth Science*, 44(2): 513-523]
- 张春生, 刘忠保, 施冬, 程启贵, 张荣彬, 高春宁, 李建雄. 2002. 涌流型浊流形成及发展的实验模拟. *沉积学报*, 20(1): 25-29. [Zhang C S, Liu Z B, Shi D, Cheng Q G, Zhang R B, Gao C N, Li J X. 2002. The simulation experiment of surge-type turbidity current formation and development. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(1): 25-29]
- 张威, 李磊, 邱欣卫, 龚广传, 程琳燕, 高毅凡, 扬志鹏, 杨蕾. 2022. A/S 对断陷湖盆三角洲时空演化的控制及数值模拟: 以珠江口盆地陆丰 22 洼古近系文昌组为例. *岩性油气藏*, 34(3): 131-141. [Zhang W, Li L, Qiu X W, Gong G C, Cheng L Y, Gao Y F, Yang Z P, Yang L. 2022. A/S control on spatiotemporal evolution of deltas in rifted lacustrine basin and its numerical simulation: a case study of paleogene Wenchang Formation in Lufeng 22 subsag, Pearl River Mouth Basin. *Lithologic Reservoirs*, 34(3): 131-141]
- 张文彪, 段太忠, 刘彦锋, 王鸣川, 廉培庆, 赵磊. 2019. 定量地质建模技术应用现状与发展趋势. *地质科技情报*, 38(3): 264-275. [Zhang W B, Duan T Z, Liu Y F, Wang M C, Lian P Q, Zhao L. 2019. Application status and development trend of quantitative geological modeling. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 38(3): 264-275]
- 张自力, 李琦, 朱筱敏, 谈明轩, 张锐锋, 曹兰柱, 李凤勋, 单帅强. 2023. 陆相断陷湖盆重力流湖底扇沉积与地震响应特征分析: 以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街组为例. *古地理学报*, 25(5): 1049-1068. [Zhang Z L, Li Q, Zhu X M, Tan M X, Zhang R F, Cao L Z, Li F X, Shan S Q. 2023. Analysis of sedimentary characteristics and seismic response of gravity flow sublacustrine fan in continental faulted lake basins: a case study of the Paleogene Shahejie Formation in Baxian Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(5): 1049-1068]
- 郑荣才, 周祺, 王华, 李凤杰. 2009. 鄂尔多斯盆地长北气田山西组 2 段高分辨率层序构型与砂体预测. *高校地质学报*, 15(1): 69-79. [Zheng R C, Zhou Q, Wang H, Li F J. 2009. The sequence architecture and sandbody prediction of the second member of Shanxi Formation in Changbei Gas Field, Ordos Basin. *Geological Journal of China Universities*, 15(1): 69-79]
- 朱红涛, Liu Ke-yu, 杜远生, 何生. 2007. 层序地层学模拟研究进展及趋势. *地质科技情报*, 26(5): 27-34. [Zhu H T, Liu K Y, Du Y S, He S. 2007. Progress and developing tendency of sequence stratigraphy simulation. *Geological Science and Technology Information*, 26(5): 27-34]
- 朱红涛, 杨香华, 舒誉, 吴静, 李敏. 2012. 陆相湖盆层序构型及其岩性预测意义: 以珠江口盆地惠州凹陷为例. *地学前缘*, 19(1): 32-39. [Zhu H T, Yang X H, Shu Y, Wu J, Li M. 2012. The sequence stratigraphic architecture of continental lake basin and its significance on lithofacies prediction: taking Huizhou sag in Zhujiangkou Basin as an example. *Earth Science Frontiers*, 19(1): 32-39]
- 朱筱敏, 康安, 王贵文. 2003. 陆相拗陷型和断陷型湖盆层序地层样

- 式探讨. 沉积学报, 21(2): 283-287. [Zhu X M, Kang A, Wang G W. 2003. Sequence stratigraphic models of depression and faulted-down lake basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(2): 283-287]
- 朱筱敏, 王华, 朱红涛, 邵龙义, 纪友亮. 2023. 陆相层序地层学研究进展及发展关注. 石油学报, 44(8): 1382-1398. [Zhu X M, Wang H, Zhu H T, Shao L Y, Ji Y L. 2023. Research progress and development concerns of continental sequence stratigraphy. *Acta Petrolei Sinica*, 44(8): 1382-1398]
- 朱筱敏. 2022. 层序地层学(第二版). 山东东营: 中国石油大学出版社, 412. [Zhu X M. 2022. *Sequence Stratigraphy(2nd ed)*. Shandong Dongying: China University of Petroleum Press, 412]
- Benavente C A, Bohacs K M. 2024. Advances in limnogeology: the lake-basin-type model revisited 25 years after anomalies, conundrums and upgrades. *The Depositional Record*, 10: 748-792.
- Blum M D, Tornqvist T E. 2000. Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward. *Sedimentology*, 47: 2-48.
- Boyd R, Diessel C F K, Wadsworth J, Leckie D, Zaitlin B A. 2000. Organization of non marine stratigraphy. In: Boyd R, Diessel C F K, Francis S(eds). *Advances in the Study of the Sydney Basin. Proceedings of the 34th Newcastle Symposium*. University of Newcastle, Callaghan, New South Wales, Australia: 1-14.
- Bristow C S, Best J L. 1993. Braided rivers: perspectives and problems. In: Best J L, Bristow C S(eds). *Braided Rivers*. Geological Society Special Publication, 75: 1-11.
- Burgess P M. 2001. Modeling carbonate sequence development without relative sea-level oscillations. *Geology*, 29(12): 1127-1130.
- Burgess P M. 2016. Identifying ideal stratigraphic cycles using a quantitative optimization method. *Geology*, 44(6): 443-446.
- Burgess P M, Allen P. 2014. A forward-modelling analysis of the controls on sequence stratigraphical geometries. *Geological Society London Special Publications*, 103(1): 9-24.
- Burgess P M, Lammers H, van Oosterhout C, Granjeon D. 2006. Multivariate sequence stratigraphy: tackling complexity and uncertainty with stratigraphic forward modeling, multiple scenarios, and conditional frequency maps. *AAPG Bulletin*, 90(12): 1883-1901.
- Carboneau P E, Bergeron N E. 2000. The effect of bedload transport on mean and turbulent flow properties. *Geomorphology*, 35: 267-278.
- Carroll A R, Bohacs K M. 1999. Stratigraphic classification of ancient lakes: balancing tectonic and climatic controls. *Geology*, 27(2): 99-102.
- Catuneanu O. 2006. *Principles of Sequence Stratigraphy*. Amsterdam: Elsevier, 375.
- Catuneanu O. 2017. Sequence stratigraphy: guidelines for a standard methodology. In: Montenari M(ed). *Stratigraphy and Timescales*. vol. 2. Academic Press, UK: 1-57.
- Catuneanu O. 2019. Model-independent sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 188: 312-388.
- Catuneanu O, Zecchin M. 2016. Unique vs. non-unique stratal geometries: relevance to sequence stratigraphy. *Marine and Petroleum Geology*, 78: 184-195.
- Catuneanu O, Galloway W E, Kendall C G S C, Miall A D, Posamentier H W, Strasser A, Tucker M E. 2011. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. *Newsletter Stratigraphy*, 44(3): 173-245.
- Costello W R, Southard J B. 1981. Flume experiments on lower-flow-regime bed forms in coarse sand. *Journal of Sedimentary Research*, 51(3): 849-864.
- Cross T A, Lessenger M A. 1999. Numerical experiments in stratigraphy: recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations. In: Harbaugh J W, Watney W L, Rankey E C, Goldstein, R H, Franseen E K(eds). *Numerical Experiments in Stratigraphy. Recent Advances in Stratigraphic and Sedimentologic Computer Simulations*, 62: 69-83.
- Deacon G F. 1894. Discussion of estuaries by Partiotz H L. *Institution Civil Engineers(London) Proc*, 118: 47-189.
- Embry A F, Johannessen E P. 1992. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic-Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. In: Vorren T O, Bergsager E, Dahl-Stamnes O A, Holter E, Johansen B, Lie E, Lund T B(eds). *Arctic Geology and Petroleum Potential*. Norwegian Petroleum Society(NPF), 2: 121-146.
- Dubrule G. 1986. A review of stochastic models for petroleum reservoirs. *Geostatistics*, 1(2): 233-247.
- Galloway W E. 1989. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis, I. Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. *AAPG Bulletin*, 73: 125-142.
- Gilbert G K. 1895. Sedimentary measurement of geologic time. *Journal of Geology*, 3: 121-127.
- Gilbert G K. 1914. The Transportation of Debris by Running Water. U.S. Geology Survey Profession Paper, 86: 263-367.
- 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, Goldstein, R H, Franseen E K(eds). 2001. *Numerical Experiments in Stratigraphy. Recent Advances in Stratigraphic and Sedimentologic Computer Simulations*, 62: 197-210.
- Griffiths C M, Dyt C, Paraschivou E, Ciu K. 2001. Sedsim in hydrocarbon exploration. In: Merriam D F, Davis J C(eds). *Geological modeling and simulation: sedimentary systems: computer applications in the earth sciences*. Academic Publishers: 71-97.
- Harbaugh J W. 1966. Mathematical simulation of marine sedimentation with mM 7090n094 computers. *Kansas Geology Survey Computer Contr*, 1: 52.
- Harbaugh J W, Bonham-Carter G. 1970. *Computer simulation in geology*. New York: Wiley Inters Science, 575.
- Harris D G. 1975. The role of geology in reservoir simulation studies. *JPT*, 27: 625-632.
- Helland-Hansen W, Kendall C G St C, Lerche I, Nakayama K. 1988. A simulation of continental basin margin sedimentation in response to crustal movements, eustatic sea level change, and sediment accumu-

- lation rates. *Mathematical Geology*, 20(7): 777-802.
- Hunt D, Tucker M E. 1992. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract-deposition during base-level fall. *Sedimentary Geology*, 81(1-2): 1-9.
- Jordan T E, Flemings P B. 1991. Large-scale stratigraphic architecture, eustatic variation, and unsteady tectonism: a theoretical evaluation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 96(B4): 6681-6699.
- Journel A G. 1994. Stochastic Modeling and neostatistics: principles, methods, and case studies. In: Chamber Y. *Geostatistics and reservoir geology*. AAPG Computer Application in Geology: 379.
- Kaufman J. 1994. Numerical-models of fluid-flow in carbonate platforms-implications for dolomitization. *Journal of Sedimentary Research Section A-Sedimentary Petrology and Processes*, 64(1): 128-139.
- Leckie D A, Boyd R. 2003. Towards a nonmarine sequence stratigraphic model. *American Association of Petroleum Geologists Annual Convention*. Salt Lake City, 11-14 May 2003, Official Program, 12: A101.
- Liu K Y, Liang T C K L, Paterson L, Kendall C G S C. 1998. Computer simulation of the influence of basin physiography on condensed section deposition and maximum flooding. *Sedimentary Geology*, 122: 181-191.
- Lorenz E N. 1993. *The Essence of Chaos*. Washington: University of Washington Press.
- Miall A D. 1992. The Exxon global cycle chart: an event for every occasion? *Geology*, 20: 787-790.
- Mitchum Jr R M, Vail P R, Thompson III S. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 2: the depositional sequence as a basic unit for stratigraphic analysis. In: Payton C E (ed). *Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration*. AAPG Memoir, 26: 53-62.
- NACSN (North American Commission on Stratigraphic Nomenclature). 1983. *North American Stratigraphic Code*. AAPG Bulletin, 67: 841-875.
- Nummedal D, Riley G W, Templet P L. 1993. High-resolution sequence architecture: a chronostratigraphic model based on equilibrium profile studies. In: Posamentier H W, Summerhayes C P, Haq B U, Allen G P (eds). *Sequence Stratigraphy and Facies Associations*. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 18: 55-68.
- Posamentier H W, Vail P R. 1988. Eustatic controls on clastic deposition. II. Sequence and systems tract models. In: Wilgus C K, Hastings B S, Kendall C G S C, Posamentier H W, Ross C A, van Wagoner J C (eds). *Sea Level Changes-an integrated approach*. SEPM Special Publication, 42: 125-154.
- Prince G D, Burgess P M. 2013. Numerical modeling of falling-stage topset aggradation: implications for distinguishing between forced and unforced regressions in the geological record. *Journal of Sedimentary Research*, 83(9-10): 767-781.
- Schumm S A, Khan H R. 1971. Experimental study of channel patterns. *Nature*, 233(5319): 407-409.
- Shanley K W, McCabe P J. 1994. Perspectives on the sequence stratigraphy of continental strata. *AAPG Bulletin*, 78(4): 544-568.
- Song, Y K, Yin T J, Zhang C M, Wang N N, Hou X Y. 2020. Application of sedimentary numerical simulation in sequence stratigraphy study. *Arabian Journal of Geosciences*, 13: 267.
- Steckler M S D J, Reynolds B J, Coakley B A, Swfr R D, Jarrard. 1993. Modeling passive margin sequence stratigraphy. In Posamentier H W, Summerhayes C P, Haq B U, Ajiep G P (eds). *Sequence stratigraphy and facies associations*. International Association of Sedimentologists Special Publication, 18: 19-41.
- Strobel J, Cannon R, Kendall C St C, Biswas G, Bezdek J. 1989. Interactive (SEDPACK) simulation of elastic and carbonate sediments in the shelf to basin settings. *Computer Geoscience*, 15: 1279-1290.
- Tetzlaff D M, Harbaugh J W. 1989. *Simulating Elastic Sedimentation*. New York: Van Nostrand Reinhold, 202.
- Thorne J A, Swift D J P. 1991. Sedimentation on continental margins, VI. A regime model for depositional sequences, the component systems tracts, and bounding surfaces. In: Swift D J P, Oertel G F, Tillman R W, Thorne J A (eds). *Shelf Sand and Sandstone Bodies*. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 14: 189-255.
- Vail P R, Mitchum R M, Todd R G. 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea-level. In: Payton C E. *Seismic stratigraphy-applications to hydrocarbon exploration*. AAPG Memoir, 26: 49-211.
- Waltham D. 1992. Mathematical modelling of sedimentary basin processes. *Marine and Petroleum Geology*, 9(3): 265-273.
- Wijbenga J H A, Klaassen G J. 1983. Changes in bedform dimensions under unsteady flow conditions in a straight flume. *Modern and Ancient Fluvial Systems*, 6: 35-48.
- Zavala C, Liu H Q, Li X B, Valentin T, Yang L, Mariano A, Agustin Z. 2024. High-frequency lacustrine sequence stratigraphy of clastic lakes: lessons from ancient successions. *Journal of Palaeogeography*, 13(4): 621-645.
- Zhang J Y, Burgess P M, Granjeon D, Steel R. 2019. Can sediment supply variations create sequences? Insights from stratigraphic forward modelling. *Basin Research*, 31(2): 274-289.
- Zhang Z L, Zhu X M, Zhang R F, Li Q, Shen M, Zhang J. 2020. To establish a sequence stratigraphy in lacustrine rift basin: a 3D seismic case study from Paleogene Baxian sag in Bohai Bay Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 120: 104505.
- Zhu H T, Liu K Y, Yang X H, Liu Q H. 2013. Sedimentary controls on the sequence stratigraphic architecture in intra-cratonic basins: an example from the Lower Permian Shanxi Formation, Ordos Basin, northern China. *Marine and Petroleum Geology*, 45: 42-54.

(责任编辑 郑秀娟)