

# 可容纳空间转换系统的定量模拟

朱红涛<sup>1,2</sup>, Keyu Liu<sup>2</sup>, 杜远生<sup>3</sup>, 李敏<sup>1</sup>, 王继立<sup>4</sup>

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
2. CSIRO Petroleum Resources, P. O. Box 1130, Bentley, W. A. 6102, Australia
3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074
4. 中海石油(中国)有限公司东海西湖石油天然气作业公司, 上海 200030

**摘要:** 为探讨盆地两侧可容纳空间和层序叠加模式的非一致性变化, 利用 SEDPAK 二维层序模拟软件, 通过考虑控制层序沉积过程的不同参数, 对可容纳空间转换系统进行定量模拟并提出新的认识. 模拟结果表明, 盆地两侧同期层序叠加模式可以分为“同步”和“非同步”两种, 同步叠加模式多出现在层序的低位体系域及高位体系域后期, 非同步叠加模式多出现在层序的水进体系域及高位体系域初期. 多种地质参数的合理组合, 盆地两侧同期层序均可形成非同步叠加模式. 非同步叠加模式对体系域界面的识别、层序对比具有一定的参考价值.

**关键词:** 层序地层学; 定量地层模拟; 可容纳空间转换; 非同步叠加模式; SEDPAK; 计算机模拟.

中图分类号: P539.2 文章编号: 1000-2383(2009)05-0819-10 收稿日期: 2008-12-20

## Quantitative Simulation and New Consideration on the Transformation System of the Accommodation Space

ZHU Hong-tao<sup>1,2</sup>, Keyu Liu<sup>2</sup>, DU Yuan-sheng<sup>3</sup>, LI Min<sup>1</sup>, WANG Ji-li<sup>4</sup>

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. CSIRO Petroleum Resources, P. O. Box 1130, Bentley, W. A. 6102, Australia
3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
4. The East China Sea Xihu Oil & Gas Operating Company, CNOOC, Shanghai 200030, China

**Abstract:** To discuss the non-synchronous change of accommodation space and sequence stacking patterns in both sides of a basin, using the SEDPAK two-dimensional stratigraphic modelling program, the “transformation system of the accommodation space” within a basin was simulated by considering the various parameters controlling the deposition of a sequence. The simulation results indicate that isochronous sequence stratigraphy within a basin may exhibit both synchronous and non-synchronous stacking patterns at different part of the basin. Synchronous stacking patterns were observed to be primarily developed during the lowstand system tracts and the late highstand system tracts. Non-synchronous stacking patterns were found to be often associated with the transgressive system tracts and the early highstand system tracts. The development of non-synchronous stacking patterns may occur under a number of circumstances within a basin with the right combination of various parameters. Non-synchronous stacking patterns of isochronous sequence stratigraphy may provide new reference to identify system tracts interface and develop sequence stratigraphic correlation.

**Key words:** geology stratigraphy; quantitative stratigraphic simulation; transformation of accommodation space; non-synchronous stacking pattern; SEDPAK; computer simulation.

层序地层模拟(或称定量层序地层学)是构成层序地层学理论的重要部分, 是层序分析的一项常规研究手段和技术方法(顾家裕和张兴阳, 2006). 近年来, 被广泛的应用于石油勘探和生产领域, 尤其在地

基金项目: 国家自然科学基金(No. 40702024); “构造与油气资源”教育部重点实验室开放研究基金(No. TPR-2009-33); 教育部留学回国人员科研启动基金(2009022014).

作者简介: 朱红涛(1976-), 男, 副教授, 博士后, 研究方向为层序地层学. E-mail: zhuht-oscar@yahoo.com.cn

层解释和盆地分析方面发挥着重要的作用. 不像传统的层序地层分析方式, 层序地层模拟可以定量地评价控制沉积地层形成的不同地质参数, 并能实现层序的时间—空间即时转换, 例如对盆地沉降、基准面的变化、沉积物供给、沉积物压实、沉积与剥蚀过程和沉积体形态参数等的定量描述 (Liu *et al.*, 1998). 因此, 该技术是一种有效的、直观的分析、探讨沉积过程和盆地演化的工具. 同时, 不断发展的计算机技术, 是模拟层序地层学研究的基础; 随着油气田勘探开发的深入研究, 对油气藏的认识要求也越来越高, 需要深入揭示层序叠加模式和发育过程, 刻画岩相纵向上组合特征和横向上展布特征, 研究沉积体系和沉积相带的形成规律, 分析有利生油相带以及横向上储集相带的演变规律, 明确在含油气盆地中生、储、盖在空间上的成藏配置关系等问题, 这些为模拟层序地层学指明了发展方向 (李思田等, 2002; 冯有良等, 2004; Cai *et al.*, 2008; 蒋恕等, 2008; Zhu *et al.*, 2008).

层序地层学的概念和理论模型强调的是海(湖)平面升降的一致性、同步性和旋回性 (Vail *et al.*, 1977; Posamentier and Vail, 1988; Van Wagoner *et al.*, 1990; Posamentier and Morris, 2000). 全球只有一个海洋, 全球各点的海平面变化一致性才使它们的升降变化曲线可以异地对比. 陆相湖盆的水体独立于海洋之外, 虽然湖平面变化受到全球气候一致性变化的影响, 如冰期、间冰期、干旱气候和温湿气候等, 但是陆相湖盆的多物源、近物源的典型特征, 使得水体不连通的湖盆之间都不能完全进行湖平面升降曲线对比, 但是同一个湖盆不同点的湖平面变化曲线是可以对比的. 在同一盆地内, 具有相同的湖平面升降运动, 可容纳空间的变化也具有同步性, 致使盆地两侧层序叠加样式也具有同步性, 即湖平面上升、沉积物退积、湖平面下降和沉积物进积.

可容纳空间大小主要受海(湖)平面、构造沉降控制, 可容纳空间的变化则更为复杂, 同时受盆地古地形(几何形态)、沉积物供应控制 (Galloway, 1989; Thorne and Swift, 1991; Posamentier and Allen, 1993; Liu *et al.*, 1998). Coe and Church (2003) 指出无论海平面上升或下降, 改变沉积物供应量可以产生准层序组退积或进积的叠加模式; Leckie (1994)、Goodbred and Kuehl (2000) 研究指出海进期间, 高沉积物供应速率同样可以产生进积的叠加模式.

Jiang *et al.* (2005) 提出可容纳空间转换系统的概念, 该系统由可容纳空间增加带、可容纳空间减少

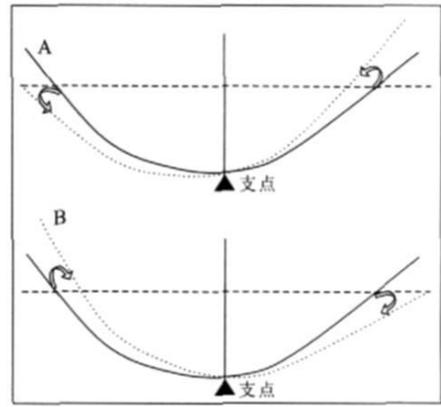


图 1 构造活动以支点做“跷跷板”式运动(可容纳空间转换系统, 据 Jiang *et al.*, 2005 修改)

Fig. 1 Seesaw movement of tectonic subsidence via a fulcrum

A. 支点左侧沉降, 右侧抬升; B. 支点左侧抬升, 右侧沉降

带、可容纳空间转换带(过渡带)以及可容纳空间转换边界组成; 进一步指出在一定的构造沉降条件下, 随时间和空间的变化, 同一盆地两侧的可容纳空间变化呈“跷跷板”(seesaw)运动交替变化(图 1). 如图 1 所示, 假设海平面静止, 盆地以某一支点做“跷跷板”式的构造倾翘运动, 支点两侧的可容纳空间相反变化. 当支点的左侧盆地发生沉降活动, 左侧可容纳空间增大, 盆地右侧相应地发生抬升活动, 右侧可容纳空间减小; 当支点的左侧盆地发生抬升活动, 左侧可容纳空间减小, 盆地右侧相应地发生沉降活动, 右侧可容纳空间增大.

本文主要应用 SEDPAK 二维层序模拟软件对可容纳空间转换进行定量模拟研究, 并提出新认识. SEDPAK 是最早的二维正演地层模拟软件之一, 由美国南卡罗莱纳州大学 Kendall 领导的地层模拟研究组开发完成. 该软件主要考虑沉积物供应、海平面变化、构造沉降、盆地的几何形态和压实等地质因素, 可以从盆地两侧(双向)来模拟碎屑岩、碳酸岩混和沉积物充填沉积盆地的过程 (Liu *et al.*, 1998). SEDPAK 模拟软件主要通过设置相关的沉积相参数来定义沉积相, 这些沉积相参数包括设置沉积物岩性的百分含量(如泥岩、砂岩、碳酸岩)、沉积物离滨线的距离范围、沉积物的高程范围(古水深范围)和沉积物的孔隙度 4 种变量参数. 通过设置上述 4 种变量参数中的一种或多种参数来定义具体的沉积相类型, 本文采用定义沉积物的高程范围(古水深范围)的变量参数来区别不同沉积相类型, 如 0~0.5 m、0.5~2 m、2~5 m、5~10 m、10~15 m、15~30 m、30~

50 m > 50 m 均表示沉积物古水深的范围.

### 1 可容纳空间转换系统的模拟参数

根据可容纳空间转换系统的概念, 设计相应的实验输入模拟参数. 模拟参数包括盆地初始形态、海(湖)平面曲线、构造沉降、沉积物供应等(图 2), 模拟时间为 20 MaBP ~ 0.

按照“跷跷板”式构造倾翘活动设计相应的构造沉降模拟参数(图 2a). 如图 2a 所示, 400 km 处的构造沉降速率为 0, 以此点为构造沉降的支点, 进行“跷跷板”式的构造倾翘活动. 18 ~ 10 Ma 阶段, 在支

点的左侧(盆地缓坡带), 表现为构造抬升活动; 在支点的右侧(盆地陡坡带), 表现为构造沉降活动. 10 ~ 2 Ma 期间, 构造活动进行反转, 在支点的左侧(盆地缓坡带), 表现为构造沉降活动; 在支点的右侧(盆地陡坡带), 表现为构造抬升活动.

陆相断陷盆地有地堑式(双断)、半地堑式(单断)和复合式 3 种基本类型. 实际上, 在中国东部断陷盆地内多为半地堑式(单断)类型, 即由一控边断层活动形成的非对称性单箕状盆地. 因此, 盆地初始形态为非对称性单箕状, 左侧形态平缓(缓坡带)、右侧形态略陡(陡坡带), 盆地剖面长度为 800 km, 最大落差 300 m(图 2b).

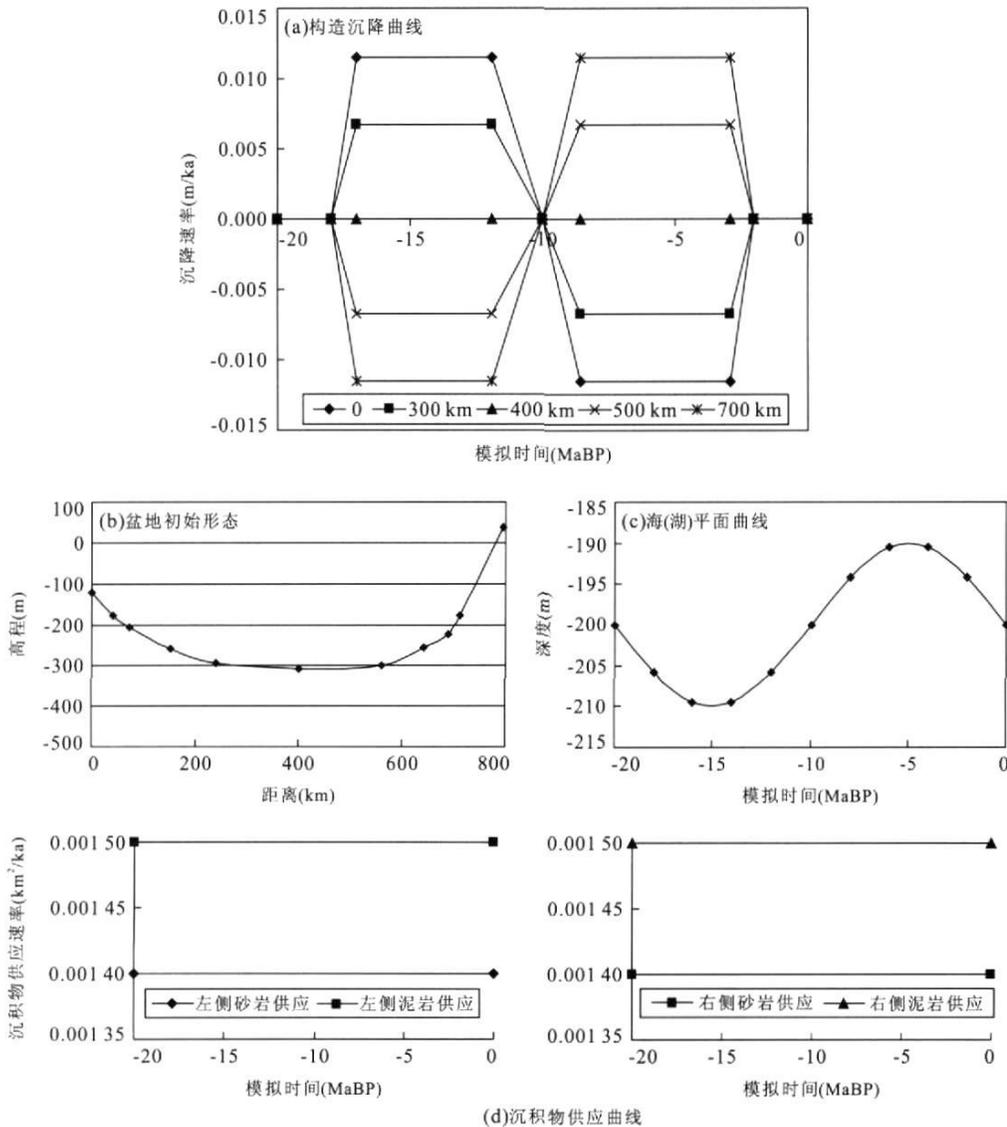


图 2 SEDPAK 层序模拟参数

Fig. 2 Input parameters used in SEDPAK simulations

模拟采用海(湖)平面曲线为正弦变化曲线(图 2c), 在 20~0 Ma 模拟时间内, 海(湖)平面变化为一个周期正弦变化曲线, 幅值变化范围 +10~-10 m。

模拟采用双向物源, 左右两侧物源的供应量设定为常量, 砂岩为  $0.0014 \text{ km}^2/\text{ka}$ , 泥岩为  $0.0015 \text{ km}^2/\text{ka}$ (图 2d)。

## 2 模拟结果探讨

基于上述模拟参数, 根据图 2 设计的构造活动沉降模拟参数, 在海平面正弦变化条件下, 盆地以 400 km 处的位置为支点, 对可容纳空间转换系统进行了模拟, 模拟结果如图 3 所示。

### 2.1 缓坡带(支点左侧)层序叠加模式

在“跷跷板”式构造倾翘沉降运动、海平面正弦变化曲线以及沉积物供应的综合作用下, 20~

18 Ma 阶段, 构造沉降速率为 0, 海平面处于下降期。因此, 盆地缓坡带的层序具有向盆地中心逐步推进的进积叠加特征; 18~16 Ma 阶段, 盆地缓坡带层序为进积特征, 进积幅度增大; 16~10 Ma 阶段, 盆地以 400 km 处的位置为支点, 左侧缓坡带持续发生的构造抬升作用致使可容纳空间减小, 盆地左侧表现为持续的进积作用; 10~3 Ma 阶段, 构造活动反转, 盆地以 400 km 处的位置为支点, 左侧持续发生的构造沉降作用致使可容纳空间增大, 盆地左侧表现为持续的退积作用; 3~2 Ma 阶段, 左侧构造沉降速率迅速减小至零, 海平面处于下降期, 构造作用对层序的控制作用小于海平面变化的作用。因此, 盆地表现为进积叠加模式; 2~0 Ma 阶段, 构造沉降速率为 0, 海平面处于下降期, 可容纳空间依然减小, 盆地左侧为进积叠加模式。

### 2.2 陡坡带(支点右侧)层序叠加模式

对于陡坡带而言, 20~18 Ma 阶段, 类似于缓坡

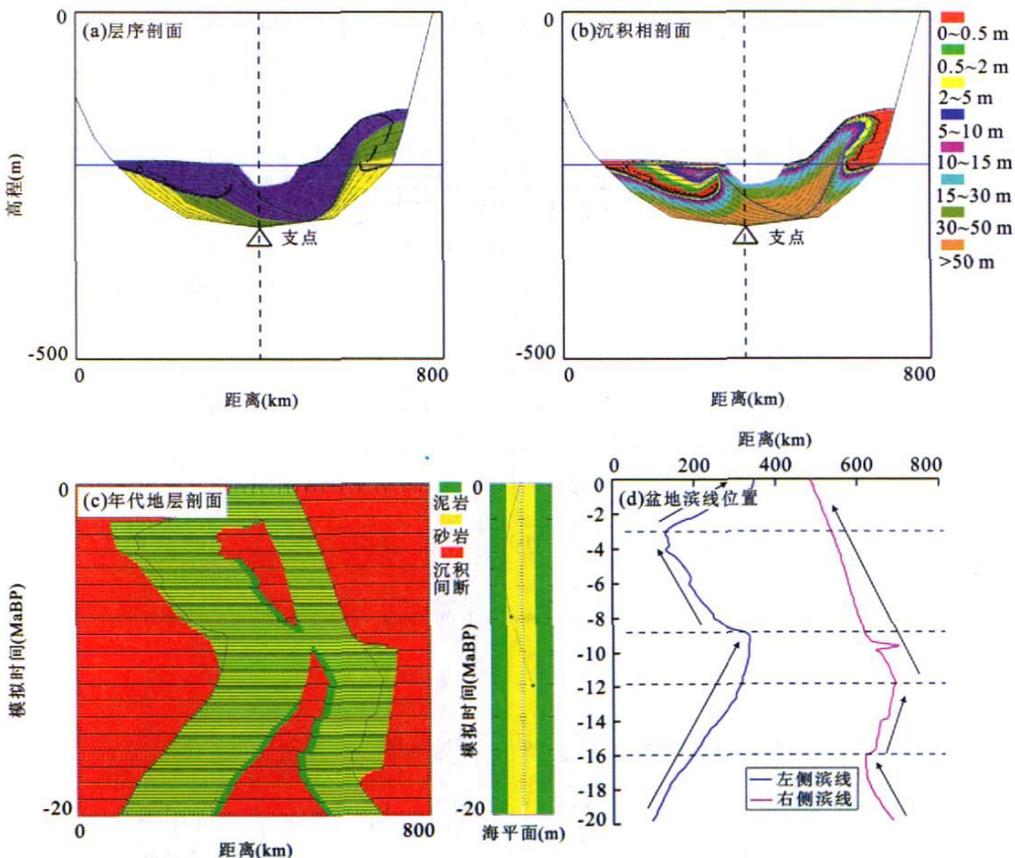


图 3 盆地两侧同期层序同步和非同步叠加模式(模拟参数:“跷跷板”式构造沉降运动、海平面正弦变化曲线)

Fig. 3 Synchronous and non-synchronous stacking patterns of isochronous sequences in a basin during a sinuous sea-level variation and a seesaw tectonic movement

带,构造沉降速率为0,海平面处于下降期,盆地右侧陡坡带的层序为向盆地推进的进积叠加特征;18~16 Ma阶段,盆地陡坡带层序为进积特征;16~10 Ma阶段,盆地以400 km处的位置为支点,右侧持续发生的构造沉降作用致使可容纳空间增大,右侧表现为持续的退积作用;10~3 Ma阶段,构造活动反转,盆地以400 km处的位置为支点,右侧持续发生的构造抬升作用致使可容纳空间减小,因此,右侧表现为持续的进积作用;3~2 Ma阶段,右侧构造抬升速率迅速减小至0,海平面处于下降期,构造作用对层序的控制作用小于海平面变化的作用,盆地右侧同样表现为进积叠加模式;2~0 Ma阶段,虽然构造沉降速率为0,海平面处于下降期,可容纳空间减小,在盆地右侧同样为进积叠加模式。

从上述模拟结果可以看出,在20~0 Ma期间,16~10 Ma阶段盆地两侧层序为非同步的叠加模式(左侧进积,右侧退积),10~3 Ma阶段盆地两侧层序为非同步的叠加模式(左侧退积,右侧进积),16~3 Ma为盆地两侧构造沉降做“跷跷板”式运动的主要时期,构造活动是造成盆地两侧同期层序非同步叠加模式的主控因素。此外,根据同期层序非同步的叠加模式出现的时间表明,这种叠加模式仅出现在层序发育的中后期(水进体系域及高位体系域初期)。

在“跷跷板”式构造沉降活动作用下,在可容纳空间转换系统中,盆地两侧同期层序的叠加模式可以分为同步和非同步两种,同步叠加模式即盆地两侧层序同为退积或进积特征,非同步叠加模式即盆地两侧层序叠加模式相反(一侧退积,另一侧则进积)。

### 3 盆地两侧同期层序非同步叠加模式形成机理探讨

通过调整地质模拟参数,进一步模拟盆地两侧同期层序非同步叠加模式的形成机理,探讨非同步叠加模式是“跷跷板”式构造沉降活动作用所特有的,还是在其他地质条件下同样能够形成这种叠加模式。

#### 3.1 非均一构造沉降活动条件下的模拟

断陷盆地是中国陆相含油气盆地重要的类型之一,而且该类盆地多为半地堑式(单断)类型,即由一控边断层活动形成的非对称性单箕状盆地,该类盆地具有非均一构造沉降活动,靠近控边断层活动带(陡坡带)沉降速率较大,远离断层活动带的缓坡带

沉降速率逐渐减小。

将“跷跷板”式构造沉降活动调整为非均一构造沉降活动,在盆地的不同位置设置不同的构造沉降速率,自左向右依次增大(17~3 Ma,300 km处的沉降速率为0.004 m/ka,500 km处的沉降速率为0.0068 m/ka,700 km处的沉降速率为0.0115 m/ka)。保持其他模拟参数不变,进行模拟。

模拟结果表明,在海平面正弦变化的情况下,从盆地开始注入沉积物,到盆地完全充填(消亡),盆地两侧同期层序同样具有同步和非同步的叠加模式。在缓坡带(盆地左侧),层序整体呈进积叠加模式,陡坡带层序则呈进积—退积—进积的变化旋回(图4)。

(1)缓坡带层序叠加模式。从图4中层序剖面、沉积相剖面、年代地层剖面和盆地滨线位置图可以看出,缓坡带一侧,总体呈进积叠加模式,只是在不同充填阶段,由于构造沉降、海平面变化及沉积物的综合作用,层序进积的幅度不同。20~12 Ma阶段,进积幅度较大,12~0 Ma期间,进积幅度较小;(2)陡坡带层序叠加模式。对于陡坡带一侧,沉降速率远大于缓坡带。20~14 Ma阶段,构造沉降及海平面所产生的可容纳空间小于沉积物供应量,层序呈进积特征,进积幅度从大到小;14~8 Ma期间,构造沉降及海平面所产生的可容纳空间大于沉积物供应量,层序呈退积特征;8~0 Ma阶段,构造沉降及海平面所产生的可容纳空间小于沉积物供应量,层序又逐渐进积,直至盆地消亡。

对比两侧的层序沉积物的叠加模式可以看出,20~14 Ma阶段,盆地两侧同期层序为同步叠加模式(进积);14~8 Ma阶段,盆地两侧同期层序为非同步叠加模式(左侧进积,右侧退积);8~0 Ma阶段,盆地两侧同期层序为同步叠加模式(进积)。因此,非均一的构造沉降活动,同样可以造成盆地两侧可容纳空间的非对称性变化,进而形成盆地两侧同期层序同步和非同步的叠加模式。此外,这种非同步的叠加模式仅出现在层序发育的中后期(水进体系域及高位体系域初期)。

#### 3.2 均一构造沉降活动的条件下,调整沉积物供应速率的模拟

将“跷跷板”式构造活动调整为均一的构造沉降活动,同时改变盆地两侧沉积物供应量,对盆地两侧同期层序的叠加模式进行研究。

假设海平面静止(-200 m),盆地充填的过程中(20 Ma),18~2 Ma期间,盆地整体构造沉降速率为0.006 m/ka;盆地左侧沉积物供应速率大于盆地右

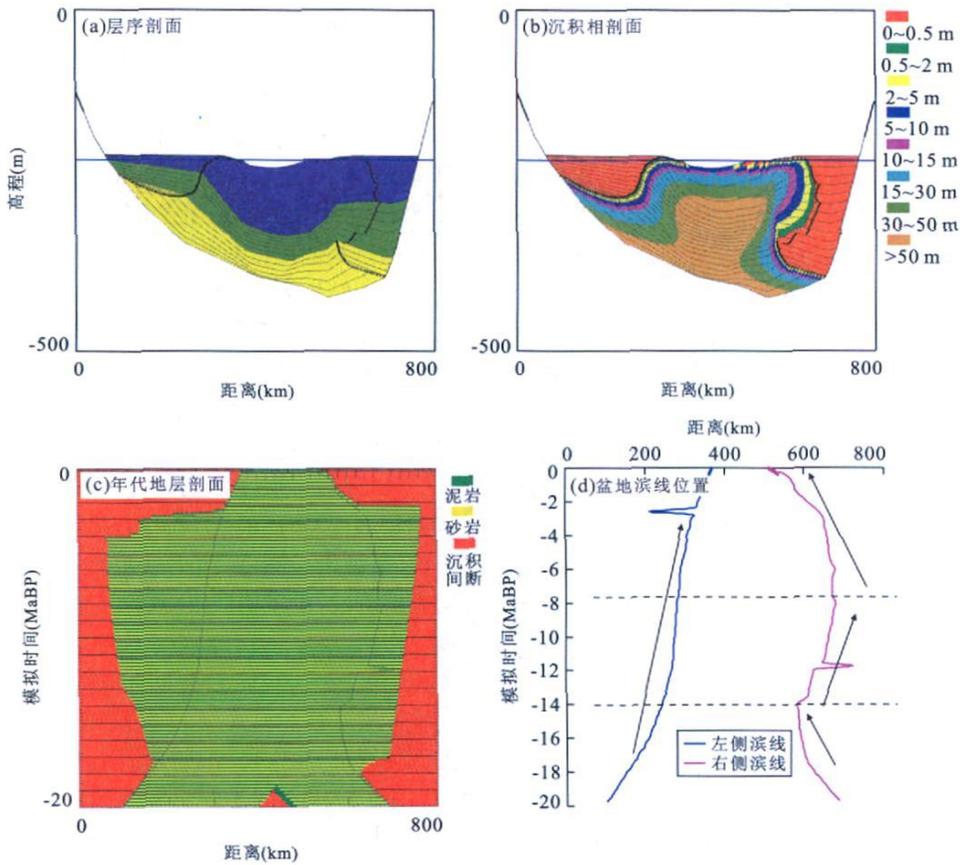


图 4 盆地两侧同期层序同步和非同步叠加模式(海平面正弦变化曲线的条件下)

Fig. 4 Synchronous and non-synchronous stacking patterns of isochronous sequences in a basin during the sinuous change of sea level

侧物源供应速率; 盆地初始形态采用图 1 中的地形. 模拟结果如图 5 所示.

(1) 盆地左侧层序叠加模式. 盆地左侧具有较大沉积物供应量. 海平面静止, 不影响可容纳空间的变化. 盆地左侧层序整体呈进积特征, 不同阶段具有不同的进积幅度. 20~18 Ma 以及 2~0 Ma 阶段, 构造沉降为 0, 海平面静止, 新增可容纳空间为 0, 沉积物均为快速进积特征. 18~2 Ma, 盆地整体下沉, 可容纳空间增大, 沉积物供应量持续增大, 新增的可容纳空间小于左侧物源沉积物供应量, 层序依然呈进积叠加模式;

(2) 盆地右侧层序叠加模式. 对于盆地右侧, 沉积物供应速率远小于盆地左侧. 盆地右侧层序整体呈进积—退积—进积叠加模式. 类似于盆地左侧, 20~18 Ma 阶段, 沉积物为快速进积特征. 18~10.6 Ma 阶段, 盆地整体下沉, 可容纳空间增大, 但是新增的可容纳空间小于右侧物源沉积物供应量, 层序沉积物依然呈进积叠加模式, 进积的幅度逐渐减小. 10.6~3.0 Ma 阶段, 可容纳空间持续增大, 沉

积物供应量逐渐减小, 新增的可容纳空间大于右侧物源沉积物供应量, 层序沉积物呈退积叠加模式; 3~0 Ma 阶段, 层序为进积叠加模式.

对比盆地两侧的层序沉积物叠加模式可以看出, 20.0~10.6 Ma 阶段, 盆地两侧同期层序为同步叠加模式(进积); 10.6~3.0 Ma 阶段, 盆地两侧同期层序为非同步叠加模式(左侧进积, 右侧退积); 3~0 Ma 阶段, 盆地两侧同期层序为同步叠加模式(进积). 非同步叠加模式仅出现在层序发育的中后期(水进体系域及高位体系域初期). 此外, 对于海平面上升或下降的情况, 在均一构造沉降与海平面变化综合作用下, 只要盆地一侧新增的可容纳空间  $\Delta A > 0$ , 通过改变沉积物的供应量就可以形成非同步叠加模式.

### 3.3 不发生构造沉降活动的条件下, 调整海平面变化及沉积物供应速率的模拟

如果不存在构造沉降活动, 构造活动不会影响到可容纳空间的变化. 现在假设不发生构造沉降活

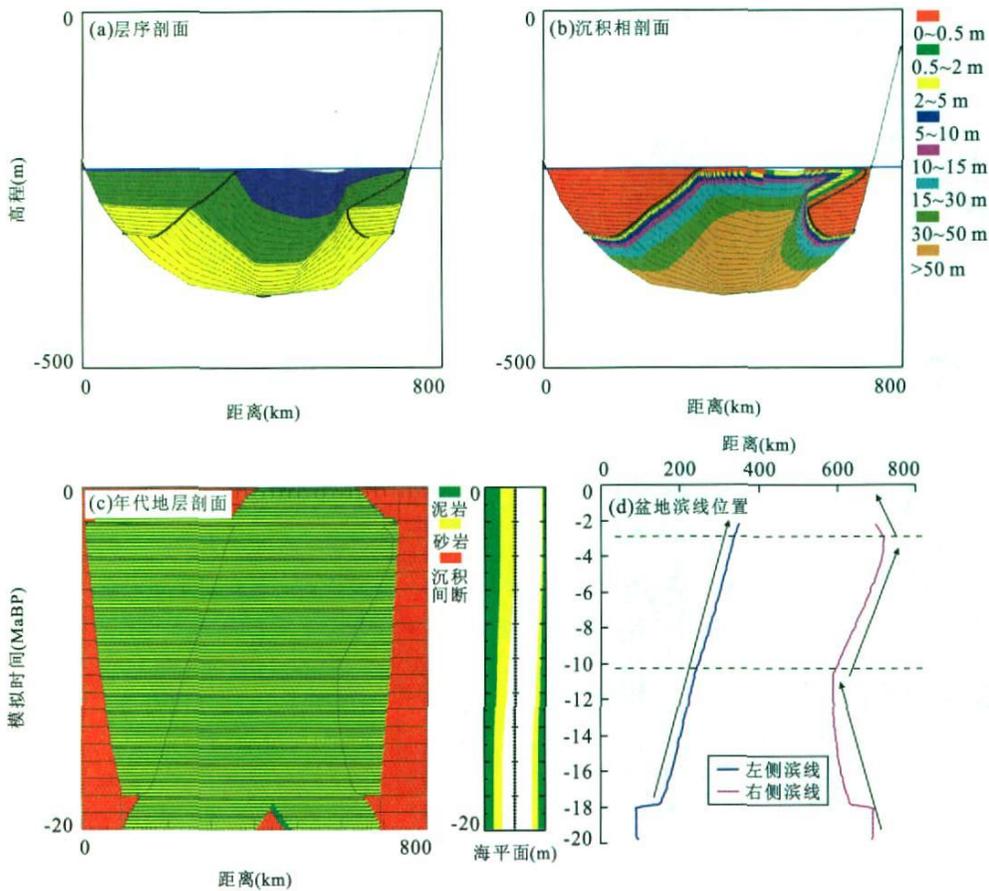


图 5 盆地两侧同期层序同步和非同步叠加模式(均一构造沉降、海平面静止的条件下, 盆地两侧沉积物供应量不同)  
 Fig. 5 Synchronous and non-synchronous stacking patterns of isochronous sequences in a basin during base level static, symmetrical tectonic subsidence and variant sediment supplies

动, 改变盆地两侧沉积物供应量, 对盆地两侧同期层序的叠加模式进行研究。

海平面变化可以分为 3 种: 上升、静止和下降。海平面静止或下降期, 可容纳空间不断减小 ( $\Delta A \leq 0$ ), 无论如何调整沉积物供应速率模拟参数, 盆地两侧同期层序总是表现为同步的进积叠加模式。

对于海平面上升期, 盆地的可容纳空间增大 ( $\Delta A > 0$ )。如果盆地一侧的沉积物供应量大于新增的可容纳空间(层序进积), 另一侧沉积物供应量小于新增的可容纳空间(层序退积), 则可能在盆地两侧同期层序出现非同步叠加模式。

不发生构造沉降活动的条件下, 海平面呈线性上升, 最初 20 Ma 时期高程为 -250 m, 最终 0 Ma 时期高程为 -100 m; 盆地左侧沉积物供应速率大于盆地右侧物源供应速率; 盆地初始形态采用图 1 中的地形。模拟结果如图 6 所示。

(1) 盆地左侧层序叠加模式。盆地左侧具有较大沉积物供应量。20.0 ~ 14.2 Ma 阶段, 海平面持续上

升, 可容纳空间增大, 但是新增的可容纳空间小于左侧物源沉积物供应量, 层序沉积物呈进积叠加模式; 14.4 ~ 4.0 Ma 阶段, 新增的可容纳空间小于左侧物源沉积物供应量, 层序沉积物呈进积特征, 但向盆地推进的速度逐渐减小; 4 ~ 0 Ma 阶段, 新增的可容纳空间小于左侧物源沉积物供应量, 层序沉积物叠加模式仍为进积; (2) 盆地右侧层序叠加模式。对于盆地右侧, 沉积物供应速率远小于盆地左侧。20.0 ~ 14.2 Ma 阶段, 海平面持续上升, 可容纳空间增大, 但是新增的可容纳空间小于右侧物源沉积物供应量, 层序沉积物呈进积叠加模式; 14.2 ~ 4.0 Ma 阶段, 新增的可容纳空间逐渐大于右侧物源沉积物供应量, 层序沉积物呈退积叠加模式, 退积幅度较大; 4 ~ 0 Ma 阶段, 新增的可容纳空间基本上等于右侧物源沉积物供应量, 叠加模式为加积特征。对比盆地两侧的层序沉积物叠加模式可以看出, 20.0 ~ 14.2 Ma 阶段, 盆地两侧的同时期层序为同步叠加模式(进积); 14.2 ~ 4.0 Ma 阶段, 盆地两侧的同时期层

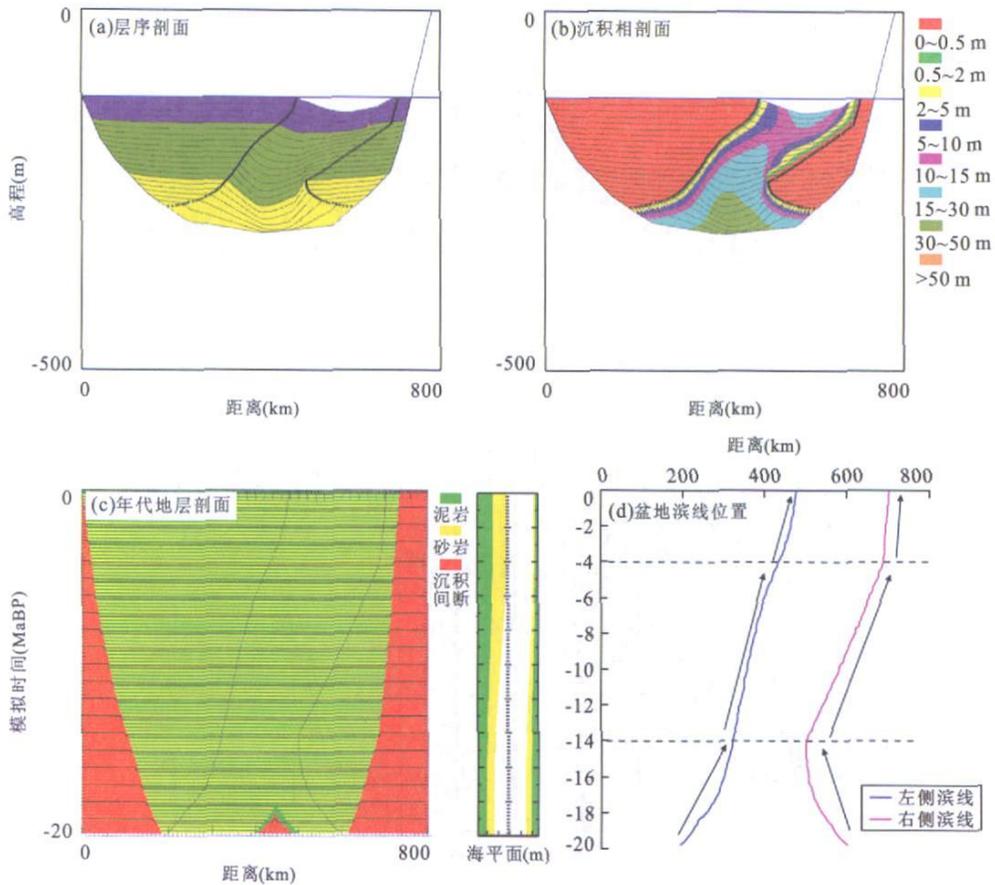


图 6 盆地两侧同期层序同步和非同步叠加模式(不发生构造沉降条件下,海平面持续上升,盆地两侧沉积物供应量不同)  
Fig. 6 Synchronous and non-synchronous stacking patterns of isochronous sequences in a basin during a rise in base level, variant sediment supplies but no tectonic subsidence

序为非同步叠加模式(左侧进积,右侧退积);4~0 Ma阶段,盆地两侧同期层序为非同步叠加模式(左侧进积,右侧加积)。同期层序非同步的叠加模式出现的时间表明,这种叠加模式仅出现在层序发育的中后期(水进体系域及高位体系域初期)。

综上所述,除了“跷跷板”式构造运动,非均一构造沉降活动也可以产生盆地两侧同期层序产生非同步叠加模式;此外,在不发生构造沉降的情况下,在海平面上升期,在适当的沉积物供应条件下(盆地一侧的沉积物供应量大于新增的可容纳空间,另一侧沉积物供应量小于新增的可容纳空间),也可以在盆地两侧同期层序出现非同步叠加模式。

盆地两侧同期层序非同步叠加模式主要是由盆地两侧可容纳空间增量( $\Delta A$ )与沉积物供应增量( $\Delta S$ )的关系所决定的。“跷跷板”式构造活动作用下,可容纳空间的增量由构造沉降及基准面控制,支点的抬升侧可容纳空间减小, $\Delta A < \Delta S$ ,层序为进积叠加模式;支点的下降侧可容纳空间增大, $\Delta A >$

$\Delta S$ ,层序为退积叠加模式,支点两侧表现为非同步叠加模式。在非均一构造沉降活动作用下,盆地两侧可容纳空间增量受到非均一构造活动及基准面的控制,沉降速率小的一侧可容纳空间增量较小, $\Delta A < \Delta S$ ,层序为进积叠加模式;沉降速率较大的一侧可容纳空间增量较大, $\Delta A > \Delta S$ ,层序为退积叠加模式,盆地两侧表现为非同步叠加模式。均一构造沉降条件下,盆地两侧可容纳空间增量受到均一构造活动及基准面的控制, $\Delta A < \Delta S$ ,层序为进积叠加模式, $\Delta A > \Delta S$ ,层序为退积叠加模式。不发生构造沉降条件下,在海平面上升期,盆地两侧可容纳空间同时增大,如果盆地一侧的 $\Delta A < \Delta S$ ,层序为进积叠加模式;盆地另一侧的 $\Delta A > \Delta S$ ,层序为退积叠加模式,盆地两侧同样可以表现为非同步叠加。可以看出,通过多种地质参数的合理组合,只要在盆地两侧同时出现 $\Delta A > \Delta S$ 和 $\Delta A < \Delta S$ 的情况,就可以形成同期层序的非同步叠加模式。

## 4 盆地两侧同期层序非同步叠加模式的研究意义

根据对可容纳空间变化的分析研究发现,由于受到基底的差异沉降、沉积物的沉积以及绝对湖平面的变化3种因素的控制,同一盆地内可容纳空间在时间和空间上的变化是非统一性的(Jiang *et al.*, 2005; 姜在兴等, 2008). 本文的模拟结果也证明同一盆地内可容纳空间变化可能是非统一性的, 进而指出在盆地两侧同期层序存在非同步的叠加模式. 从实践研究到理论模拟, 均证明非同步叠加模式确实存在, 该模式的提出具有以下意义.

(1)对基于叠加样式进行体系域划分的层序地层学理论作了进一步的完善. 传统的层序地层学认为, 在盆地演化过程中, 海(湖)平面或可容纳空间的变化是统一的. 即在同一盆地内, 具有相同的湖平面升降运动, 可容纳空间的变化也具有同步性, 致使盆地两侧层序叠加样式也具有同步性, 即湖平面上升, 形成退积的叠加模式, 湖平面下降, 形成进积叠加模式; 对于体系域而言, 低位体系域为进积和加积叠加模式, 水进体系域为退积叠加模式, 高位体系域早期为加积, 晚期为进积.

模拟结果所显示的叠加模式, 与纯粹的利用叠加样式进行体系域划分的传统层序地层学有一定区别. 即在水进体系域及高位体系域初期, 盆地两侧同期层序存在非同步的叠加模式(盆地一侧进积, 另一侧退积), 并非均为退积特征. 水进体系域及高位体系域初期可以出现进积叠加模式, 而且盆地两侧同期层序叠加模式并非同步, 是对传统层序地层学理论作了相应的补充.

(2)对识别、对比全盆等时界面(特别是体系域界面)的启示. 传统层序地层学中的体系域界面分别为初次洪泛面及最大洪泛面. 初次洪泛面是为LST与TST的分界面, 其显著特征为该面上下准层序叠加方式不同, 初次洪泛面之下以进积和加积型为主, 之上为退积型; 最大洪泛面为最大湖侵时形成的湖泛面, 为TST和HST的分界面, 典型特征为该面之下准层序叠加方式为退积型, 之上准层序叠加方式为加积型序列.

模拟结果所指示的初次洪泛面之下的准层序以进积和加积型为主, 之上可以为进积型(并非完全为退积型); 最大洪泛面之下准层序叠加方式可以为进积型, 之上准层序叠加方式为进积型序列(并非完全

为加积型).

(3)我国东部断陷盆地非同步叠加模式的控制因素. 在中国东部断陷盆地内多为半地堑式(单断)类型, 由一控边断层活动形成的非对称性单箕状盆地, 靠近控边断层活动带(陡坡带)沉降速率较大, 远离断层活动带的缓坡带沉降速率逐渐减小, 整体表现为构造沉降活动的非均一性变化. 在盆地的断陷阶段, 非均一构造沉降活动是形成盆地两侧同期层序非同步叠加模式的主控因素. 在盆地的拗陷阶段, 构造活动不强烈, 海平面上升结合盆地两侧不同的沉积物供应量是形成盆地两侧同期层序非同步叠加模式的主控因素; 此外, 在盆地的断陷及拗陷演化过程中, 陡坡带接受的沉积物远远大于缓坡带的沉积物, 这些沉积物自身的压实作用以及负载作用, 也会造成陡坡带基底沉降大于缓坡带的沉降, 从而加剧盆地两侧新增的可容纳空间非对称性变化以及形成同期层序的非同步叠加模式.

致谢: SEDPAK 二维地层模拟软件是由美国南卡罗莱纳州大学地层模拟研究组开发完成的, 衷心感谢从该研究组获得的技术支持. 本文的模拟工作是在澳大利亚CSIRO Petroleum 从事层序地层模拟的博士后研究期间完成.

## References

- Cai L. G., Zhou, Y., Bai Z. R., 2008. Main controlling factors on hydrocarbon accumulation and distribution in marine sedimentary sequences in South China. *Journal of Earth Science*, 19(6): 645–655.
- Coe, A. L., Church, K. D., 2003. Sequence stratigraphy. In: Coe, A. L., Bosence, D. W. J., Church, K. D., et al., eds., *The sedimentary record of sea-level change*. Cambridge University Press, Cambridge. Chapter 4, 57–98.
- Feng, Y. L., Zhou, H. M., Li, S. T., et al., 2004. Sequence types and subtle trap exploration in continental rift basin: A case study of Lower Tertiary of the Nanpu depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 603–608 (in Chinese with English abstract).
- Galloway, W. E., 1989. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: Architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. *AAPG Bulletin*, 73(2): 125–142.
- Goodbred S. L., Kuehl S. A., 2000. The significance of large sediment supply, active tectonism, and eustasy on margin sequence development: Late Quaternary stratigraphy and evolution of the Ganges-Brahmaputra delta. *Sedimentary Geology*, 133(3–4): 227–248.

- Gu J. Y., Zhang X. Y., 2006. The progress on onshore sequence stratigraphy and their application in the petroleum exploration and development. In: Kuang, L. C., Gu J. Y., Li, H. T., et al., eds., The new progress on petroleum sequence stratigraphy: The Fourth Session of the Oil and Gas Sequence Stratigraphy Academic Collection. Petroleum Industry Press Beijing, 1—12 (in Chinese).
- Jiang, S., Wang, H., Weimer, P., et al., 2008. Sequence stratigraphy characteristics and sedimentary elements in deepwater. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(6): 825—833 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., Lu H. B., Yu, W. Q., et al., 2005. Transformation of accommodation space of the Cretaceous Qingshankou Formation, the Songliao basin, NE China. *Basin Research*, 17(4): 569—582.
- Jiang, Z. X., Zhang L., Lin, W., et al., 2008. Research on the accommodation space transformation system in the Esz<sup>3</sup> member of the Gu'nan sag. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 26—34 (in Chinese with English abstract).
- Leckie, D. A., 1994. Canterbury plains, New Zealand—Implications for sequence stratigraphic models. *AAPG Bulletin*, 78(8): 1240—1256.
- Li, S. T., Pan, Y. L., Lu, Y. C., et al., 2002. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in Lacustrine fault basins; Sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 592—598 (in Chinese with English abstract).
- Liu, K. Y., Liang, T. C. K., Paterson, L., et al., 1998. Computer simulation of the influence of basin physiography on condensed section deposition and maximum flooding. *Sedimentary Geology*, 122(1—4): 181—191.
- Posamentier, H. W., Allen, G. P., 1993. Variability of the sequence stratigraphic model: Effects of local basin factors. *Sedimentary Geology*, 86(1—2): 91—109.
- Posamentier, H. W., Morris W. R., 2000. Aspects of the stratal architecture of forced regressive deposits. In: Hunt, D., Gawthorpe, R. L., eds., Sedimentary responses to forced regressions. *Geological Society Special Publications*, 172: 19—46.
- Posamentier, H. W., Vail, P. R., 1988. Eustatic controls on clastic deposition: II—Sequence and systems tract models. In: Wilgus C. H., Hastings B. S., Kemdall C. G. St. C., et al., eds., Sea-level changes—An integrated approach. *SEPM Special Publication*, 42: 125—154.
- Thorne, J. A., Swift, D. J. P., 1991. Sedimentation on continental margins II: Application of the regime concept. In: Swift, D. J. P., Oertel, G. F., Tillman, R. W., et al., eds., Shelf sand and sandstone bodies. *Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ.*, 14: 33—58.
- Vail, P. R., Mitchum, R. M., Thompson, S., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, Part 4. Global cycles of relative changes of sea level. In: Payton C. E., ed., Seismic stratigraphy—Applications to hydrocarbon exploration. *AAPG Memoir*, 26: 83—97.
- Van Wagoner, J. C., Mitchum, R. M., Campion, K. M., et al., 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops. *AAPG Methods in Exploration Series*, 7: 1—8.
- Zhu, H. T., Du, Y. S., Liu, K. Y., et al., 2008. Sequence stratigraphic delineation and correlation of the Dongying Formation in the nearshore and adjacent sea areas Bohai Bay basin. *Journal of China University of Geosciences*, 19(1): 54—64.

#### 附中文参考文献

- 冯有良, 周海民, 李思田, 等, 2004. 陆相断陷盆地层序类型与隐蔽油气藏勘探——以南堡凹陷古近系为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(5): 603—608.
- 顾家裕, 张兴阳, 2006. 陆相层序地层学进展及在油气勘探开发中的应用. 见: 匡立春, 顾家裕, 吕焕通, 等. 油气层序地层学新进展——全国第四届油气层序地层学大会学术论文集. 北京: 石油工业出版社, 1—12.
- 蒋恕, 王华, Weimer Paul, 2008. 深水沉积层序特点及构成要素. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(6): 825—833.
- 姜在兴, 张乐, 吝文, 等, 2008. 孤南洼陷古近系沙三段中亚段可容空间转换系统研究. *地学前缘*, 15(2): 26—34.
- 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等, 2002. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术——高精度地震探测基础上的层序地层学研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 592—598.