

盆地演化的计算机模拟:回顾·应用·展望

王璞珺

杜小弟

王东坡

(长春地质学院能源系)

(长春地质学院能源研究所)

[内容提要]本文回顾了盆地模拟研究的发展简史和研究现状,以盆地充填过程模拟为例讨论了盆地模拟在研究沉积程序主要控制因素方面的应用,对盆地分析研究的发展方向、盆地模拟研究的重点以及沉积工作者的任务和作用做了尝试性展望。

关键词: 盆地模拟 回顾 应用 展望

1 引言

盆地模拟(basin modelling)是盆地分析的一种定量研究方法。它是将盆地形成的各种地质过程用数学模型表示(理论方程式、经验公式或半经验公式等)并通过计算机使其程序化,输入各种有关的局部性、区域性和全球性参数(数值、表达式或曲线以及边界条件和初始条件等),然后用计算机在这些参数的限定下求解上述数学模型,并将结果用图形或数值表示出来。这里所说的全球性参数主要指全球性海平面升降和盆地所处的板块构造位置等;区域性参数如基底沉降史、区域构造应力场、区域热流以及碎屑输入速率和碳酸盐沉积物形成速率等;局部性输入参数随研究目的不同而不同,例如层序模拟中以地质和物探资料为主,而在成烃模拟中则往往以输入有机地化指标为主等等。初始条件和边界条件亦随研究目的而异,例如在层序模拟中它们主要指盆地的初始形态和古水深以及盆地边缘构造性质和坡角稳定性等。按研究目的,盆地模拟可分为沉积过程模拟、沉降历史模拟、热演化史模拟、盆地充填过程模拟、油气生成和运移史模拟以及盆地形成与演化全过程的综合模拟等。按研究对象的可模拟空间数,盆地模拟又可分为一维模拟(如单井模拟)、二维模拟(如剖面模拟)和三维模拟以及附加时间座标的四维模拟。盆地分析是涉及到地球动力学、流体力学、热力学和化学等许多学科的综合性研究。盆地模拟法进行盆地分析的最大优越性是:它能最大限度地综合各相关领域的最新研究成果,并能充分考虑到各地质过程间的相互作用关系,所以它能够在现有的知识水平上更趋于真实地再现盆地的形成演化过程,从而大大提高了解决实际问题的能力或可能性。由于它信息容量大、计算速度快,综合能力强并能自我完善,所以盆地模拟会有很强的预测功能。

2 盆地模拟研究的回顾与展望

盆地模拟是在沉积过程定量模拟的基础上发展起来的。据现有可查阅资料,沉积过程的

定量模拟研究始于本世纪 60 年代(可能与计算机技术的发展与应用有关),例如 Bonham 和 Sutherland(1967)对河口沉积物的扩散与沉降过程进行了计算机模拟;Harbaugh(1966)用 IBM 系列计算机实现了对海相环境沉积作用的三维定量模拟。该模型可以模拟出海相碳酸盐/碎屑岩层序的沉积相分布和动物群序列的平面图、剖面图和模块式立体图。这一定量模型实际上可以认为是第一个盆地模拟模型。

70 年代,层序地层学研究的兴起和全球海平面研究资料的积累(Sloss, 1963; Vail et al., 1977)促进了盆地模拟研究的发展,人们开始模拟某些沉积地层的形成过程,并用将今论古的思想模拟古代地层和盆地演化的某些过程,例如 Halepaska 等(1972)对盆地的热流史进行了三维数值模拟;Bridge 和 Leeder(1979)模拟了冲积相地层的形成过程。该模拟系统可定量再现侧向加积、沉积物压实、构造活动和河道变迁等动态过程;用于油气盆地定量评价的盆地模拟系统,由原联邦德国的 Jullch 石油与有机地球化学研究所的 Yukler 等人(1978)首次提出。该模型为一个一维模拟系统,可对盆地的层序发育史、流体运移史和热演化史进行一维动态模拟。这一系统的基本思想是:先将地质模型按质量守恒和能量平衡原理转化成积分方程等各类非线性方程(数学模型),然后用拉格朗日隐式有限差分法求其数值解,最后将结果用数值或平面图形表示出来。

80 年代以后,随着层序地层学和全球海平面变化史研究的进展以及盆地沉降机制的深入研究(Van Vagoner, et al., 1988; Haq et al., 1987; Cloetingh, 1986),尤其是适应油气勘探工作的实际需要,盆地模拟研究得到了迅速发展,已涉及到盆地充填序列、热演化史和烃类形成运移史等与盆地的形成与演化过程相关的各个方面。现就该期的几个具代表性盆地模拟系统作简要评述。

(1)盆地充填序列模拟(basin filling or stratigraphic simulation) 在该期盆地模拟研究中占有首要位置。Tetzlaff(1986)的三维模拟系统(SED SIM 模型)可对河流、三角洲、水下谷道和浊积扇等四类碎屑沉积体系进行沉积层序模拟。该模型以流体力学为基础,运算结果的确定性强。模拟结果可用等值线、剖面图或立体模块图表示。但该模型的缺欠是没有考虑压实作用及基底沉降对盆地充填序列的影响。Flemings 和 Jordan(1987)以推覆载荷引起基底弹性挠曲的地质模型为基础,研究出专用于陆相盆地沉积层序的模拟系统。盆地充填序列方面较为完善的模拟系统由壳牌石油公司 Lawrence(1990)和 Aigner(1990)等人提出该模型可模拟碎屑岩层序、碳酸盐层序和二者互层层序;可用于研究(再现)盆地在其形成与演化各地质时期的盆地形态、层序形态、不整合的时空分布和相带展布;还可用于预测储层分布、限定测井和地震资料的解译、检验边远盆地的勘探方案和评价盆地层序的主要控制因素。另外,该系统具自我修正功能,其模拟结果可直接与实测剖面或物探资料比较,然后自动调节输入参数重新计算。该系统模拟盆地充填序列时所需要的输入参数主要有全球海平面升降曲线、基底沉降史、盆地初始形态和古水深以及碎屑沉积物供给速率、碳酸盐沉积物生成速率和深海沉积速率等。

(2)盆地热演化史模拟 在盆地模拟研究中占重要位置。具代表性的是法国 Rueil-Malmaison 石油研究所 Burrus 等人(1986)研制的盆地热演化史一维模拟系统(MONOCLE 模型)。该模型可模拟盆地热演化史、计算有机质成熟度、烃类产率和生油气窗口;并能再造局部重力均衡条件下的盆地沉降历史。该程序所需的基本输入参数为盆地的地震反射结构、盖层岩性序列和现今热流测量结果。该系统的数学模型是非均匀介质中的热传导与外力趋动对流

的二阶微分方程。模拟计算机的实质就是在考虑沉积物压实和放射性产热影响的条件下求解此微分方程。

(3) 烃类产率和油气运移史模拟 是盆地模拟研究的出发点和归宿。1981年日本石油勘探公司提出一个二维盆地模拟系统,可计算压实量、产烃率和排烃量(方国庆,1991)。这方面的代表性研究是法国石油研究所 Doligez 等人(1986)研究的沉积热流、烃类产率和流体运移的二维模拟(THemis 模型)。该系统的基本内容是:以质量守恒原理为基础、应用回填法或回剥法(backstripping)再造盆地沉积史;以热传输理论为基础,考虑到幔-壳介层和放射性产热的影响计算盆地热演化史;以阿仑尼乌斯化学反应动力学方程(Arrhenius law)为基础计算烃类产率;以修正的达西定律(Darcy's law)为基础,结合地层压力特点模拟盆地油气水运移史。

我国石油地质工作者努力追踪盆地模拟发展前缘的同时,一直注意结合我国盆地的具体特点有所创新。70年代至80年代初期,我国以引进、消化和吸收国外的模拟系统为主。在此之后,胜利油田研究院和石油天然气总公司石油勘探研究院等部门陆续研制出适合我国东部中生代断陷盆地特点的模拟系统(介霖、王捷,1984;石广仁等,1989)。盆地模拟研究已经引起我国沉积学的高度重视。沉积学研究要与高新技术相结合,盆地分析要计算机化已被确定为我国沉积学发展的一项战略性目标(刘宝瑞,1992;李思田,1992)。

盆地演化研究的计算机定量模拟标志着盆地分析研究已全面进入了计算机时代。盆地模拟研究至少包括建立地质模型、建立数学模型、编制计算机软件和解释模拟结果等四个部分;所涉及的知识范围相当广泛,是一项极其复杂的系统工程。这对我们许多沉积学工作者来说都是一个全新的课题。如何迎接这一新知识的挑战,依作者的浅显见解,我们认为沉积学工作者在盆地模拟研究中的主要任务仍将是研究和建立更为准确的地质模型,同时要掌握模拟软件的使用并成为模拟结果解释的专家。当然,若对如何建立数学模型和计算机软件的编制过程亦有所了解,则无疑会对更合理地解释运算结果大有益处。盆地模拟方法与现有常规研究方法相结合将是今后盆地分析工作的主要研究方向。

3. 盆地模拟研究在盆地分析中的应用

3.1 盆地模拟研究的基本步骤

目前用盆地模拟方法进行盆地分析的基本过程为:根据研究区的地质条件建立(或选择、套用)适当的地质模型→转化成相应的数学模型→编制计算机程序→模拟已知区并对程序进行考验和校正→模拟未知区。其中建立数学模型和编制计算机程序是当前盆地模拟研究的关键,是综合性很强的复杂研究过程,需多学科联合攻关。而建立地质模型则总是盆地模拟研究的基础,是核心。这里的地质模型所包含的内容很广泛,比如裂谷盆地模型、热沉降模型、重力均衡模型、板内应力变化引起相对海平面波动模型以及成烃的热降解模型和排烃的毛细管力与浮力趋动模型等等。随着盆地模拟研究工作的发展,当适应于各种地质条件各类模拟软件逐渐完善并系列化以后,盆地模拟方法广泛普及从而成为盆地分析的常规研究方法。届时用盆地模拟方法进行盆地分析的步骤将简化为:根据研究区的地质条件选择合适的模拟软件→输入参数→得模拟结果并加以分析解释。

3.2 应用实例

现引 Aigner 等(1990)在阿拉伯台地 Rubal Khali 盆地的研究实例,说明盆地模拟在研究

盆地充填过程主要控制因素方面的应用。该盆地是在稳定克拉通上由早二叠世经过中生代至新生代长期发育的陆表海型盆地, 具有“层状蛋糕”型沉积层序。图 1 为该盆地下部层序 Akhdar 组(下二叠—中三叠统)的测井解释对比剖面, 此处可看作为已知实测剖面。该剖面的特点是: 下部以滨岸碎屑岩为主夹少量浅海灰岩; 中部以浅海灰岩为主夹薄层滨岸碎屑岩和潮坪蒸发岩; 上部滨岸碎屑岩增多与浅海灰岩呈略等厚互层。该层序自下而上构成一完整海进/海退旋回。上部海退旋回中可见灰岩层的削截现象。在这一完整的海进/海退旋回之上又叠加了二十几个小的海进/海退次一级旋回(韵律), 单个韵律层厚 50—200m。根据沉积学原理, 这种海进/海退的旋回特征可以有三种成因: (1) 全球性海平面升降; (2) 碎屑沉积物输入量的周期性变化; (3) 板内应力变化引起相对海平面波动。

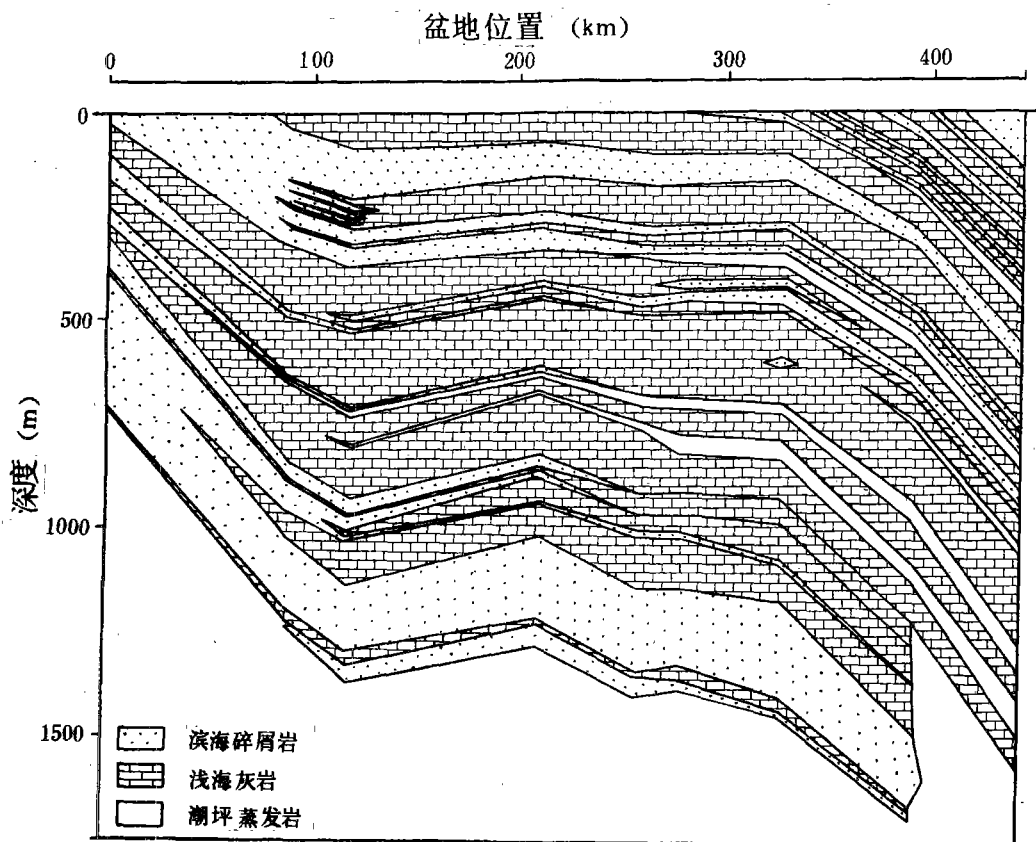


图 1 Akhdar 组测井解释对比剖面

Fig. 1 Stratigraphic cross-section of the Akhdar Formation based on well logging interpretation and correlation

然而, 对于某一具体沉积层序究竟哪种因素起了主导作用? 何为该沉积层序充填模式的主要控制因素? 用常规盆地分析方法常难以解决, 而用盆地模拟法却可以做到。因为盆地模拟相当于在计算机进行再现盆地演化史的实验, 输入参数可以随意调节。输入参数不同, 则模拟结果也不同。模拟结果与实测剖面最接近的相应那组参数, 即谓可反映实际地质条件的参数, 例如在本例中可让三个输入参数(全球海平面变化、碎屑输入量和板内应力变化)中的一个变化、另外两个不变(或规则变化), 从而找出其中的主要控制因素。图 2 为海平面波动呈复合正弦曲线(低频信号之上叠加有高频信号)而构造沉降速率和碎屑输入量不变条件下

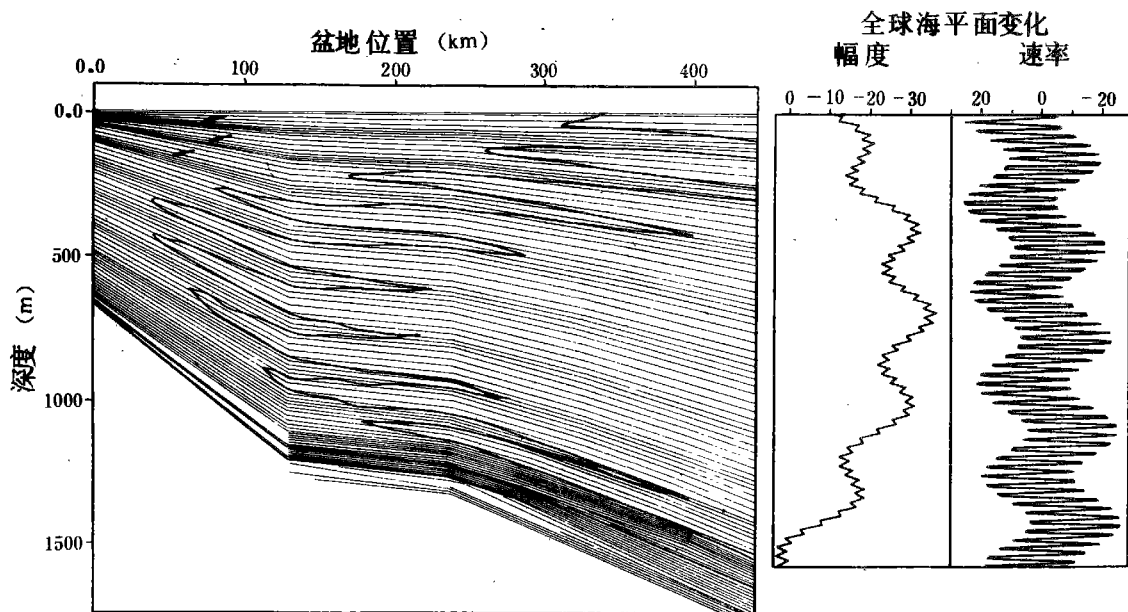


图2 Akhdar组模拟剖面(正弦波形海平面曲线)

Fig. 2 Simulated cross-section of the Akhdar Formation with sinusoidal sea-level curves

的模拟剖面。图中细线为地层层序、粗黑线为海岸线、箭头表示地层 truncation。该模拟结果反映了实测剖面(图1)的两个基本特征,即(1)自下而上相同时间间隔(0.5Ma)的相应沉积厚度呈规则变化(与碎屑岩相当段薄,与灰岩相当段厚),反映出明显的旋回性,而旋回本身由许多疏密相间的带(次一级旋回)构成;(2)旋回上部可见若干个表示陆上暴露的 truncation 面,次级旋回夹于 truncation 面之间。图3为碎屑输入量呈周期性变化而构造沉降速率和全球海平面不变条件下的模拟结果。该模拟剖面与实测剖面差异较大,因此图没有反映出实测剖面的两大基本特征(旋回性和 truncation 面)。由图可见该模拟剖面在垂向上,相同时间间隔(1Ma)的相应沉积厚度无规律性变化,即不具韵律旋回性;同时层序上部亦无 truncation 面。图4为板内应力引起相对海平面呈脉冲式高频变化、碎屑输入量呈低频正弦式变化、而全球海平面不变条件下的模拟剖面。该结果亦与实测剖面(图1)有较大差异,主要是该模拟剖面的中部出现了挠性隆起,且隆起两侧地层侧向减薄并超覆于隆起之上。这些特征在实测剖面中没有出现。

通过控制模拟输入参数,并将模拟剖面与实测剖面的主要特征相比较,我们有理由相信该沉积层序的主要控制因素是全球性海平面升降。

4 讨论

1. 盆地模拟涉及到地质模型、数学模型、编制程序以及包括初始和边界条件在内的各类输入参数。这些模型和参数的不确定性都会给模拟结果带来误差,例如用现代广海环境的碳酸盐沉积物生成速率代替古代陆表海环境的碳酸盐生成速率,会给含碳酸盐岩沉积层序的模拟带来不易估量的误差。所以,建立准确的地质模型和灵敏的数学模型、寻求更精确的输入参数将是今后盆地模拟研究的首要任务。

2. 对于多旋回的沉积盆地可按盆地演化的不同阶段分段模拟,例如巴黎盆地是一长期发育的、以中新代地层为主的沉积盆地,其三叠纪之前的发育史尚不清楚,中生代层序为:T 主要为陆相及陆缘相碎屑岩沉积; J_1 为海相页岩层系; J_{2+3} 为浅海灰岩; K_1 为陆相碎屑岩; K_2

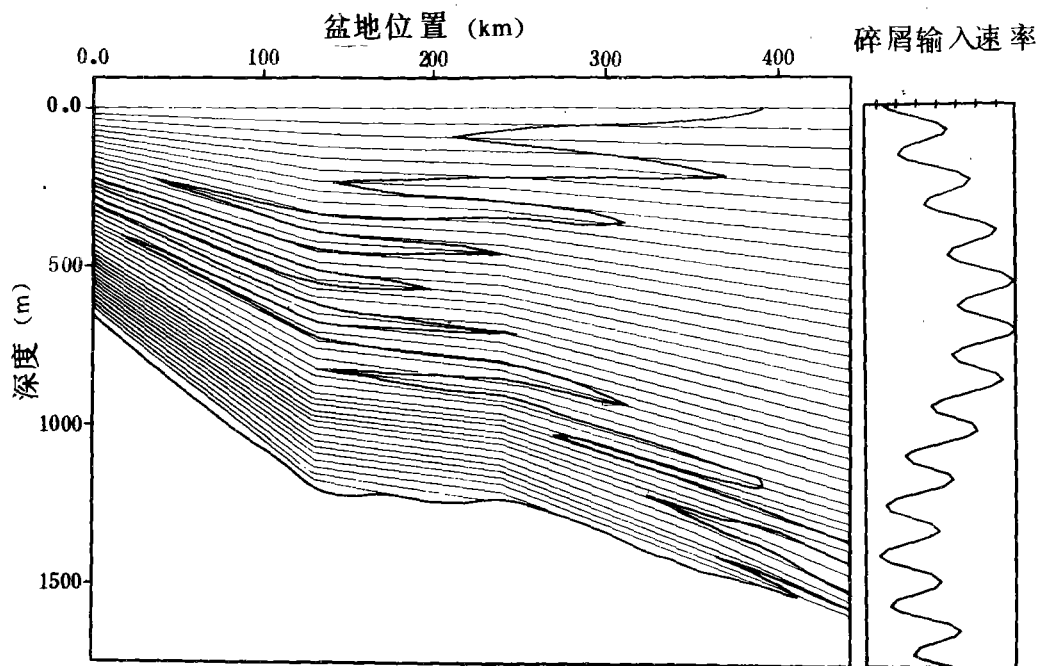


图 3 Akhdar 组模拟剖面(碎屑输入量变化)

Fig. 3 Simulated cross-section of the Akhdar Formation with fluctuating clastic input

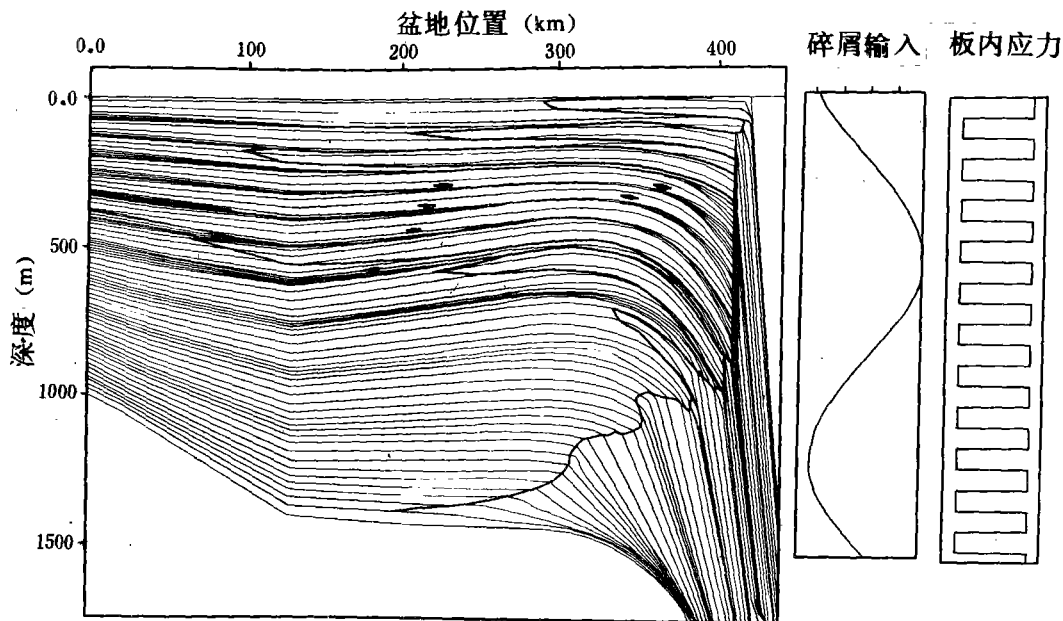


图 4 Akhdar 组模拟剖面(板内应力变化)

Fig. 4 Simulated cross-section of the Akhdar Formation with varying intraplate stress

为白垩沉积层。Aigner 等(1990)用同一模拟程序对该盆地的 T-K₂ 层段进行了分段的盆地充填过程模拟,模拟结果与实测剖面吻合很好。

3. 陆相盆地模拟与海相盆地模拟的主要差别在于:全球性海平面变化不影响陆相盆地的可容纳沉积物空间。

4. 总体来看,模拟结果的准确性完全取决于地质模型和数学模型的完善程度,例如成烃的热降解模型和成烃反应的化学动力学(计算)模型已臻完善,所以烃类产率的模拟结果往往相对稳定可靠。

本文初稿经陈琦教授详细审阅并提出具体修改意见特致谢。

参考文献

- 李思田, 1992, 论沉积盆地分析领域的追踪与创新, 沉积学报, 10(3): 10—15
- 刘宝珺, 1992, 关于沉积学发展的思考, 沉积学报, 10(3): 1—9
- 方国庆, 1991, 盆地模拟——盆地研究中的热门课题, 天然气地球科学, No. 1, p. 30—33
- 介霖、王捷, 1984, 盆地研究的地质模拟, 石油学报, No. 3, p. 9—17
- 石广仁等, 1989, 一维盆地模拟系统 BASI, 石油勘探与开发, No. 6, p. 2—11
- Aigner, T., Brandenburg, A., Van Vliet, A., Doyle, M., Lawrence, D. and Westrich, J., 1990. Stratigraphic modelling of epicontinental basins, two applications. *Sediment. Geol.*, 69: 167—190.
- Bonham-Carter, G., and A. Sutherland, 1987. Diffusion and setting of sediments at river mouths; a computer simulation model, *GCAOST*, Vol. 17, pp. 326—338.
- Bridge, J. and M. Leeder, 1979. A simulation model of alluvial stratigraphy. *Sedimentology*, Vol. 26, pp. 617—644.
- Burrus, J. and F. Bessis, 1986. Thermal modelling in the Provencal Basin. In: *Thermal Modelling in Sedimentary Basins* (Ed. by J. Burrus), pp. 394—416, Editions Technip (Paris), 600p.
- Cloetingh, S., 1986. Intraplate stress; A new tectonic mechanism for fluctuations of relative sea level. *Geology*, Vol 14, pp. 617—620.
- Doligez, B., Bessis, F., Burrus, J., Ungerer, P. and Chenet, P. Y., 1986. Integrated numerical simulation of the sedimentation, heat transfer, hydrocarbon formation and fluid migration in a sedimentary basin, the THEMIS model. In: *Thermal Modelling in Sedimentary Basins* (Ed. by J. Burrus), pp. 173—198, Editions Technip (Paris), 600p.
- Flemings, P. A. and T. E. Jordan, 1987. Synthetic stratigraphy of foreland basins. *EOS*, Vol. 68, No. 16, pp. 419.
- Halepaska, J. C., and F. W. Hartman, 1972. Numerical solution of the 3-D heat flow. *Kansas Geol. survey Bull.* 204, Pt. 1, pp. 11—13.
- Haq, B., Hardenbol, J. and Vail, P. R., 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250) million years ago to present). *Science*, 235: 1156—1167.
- Harbaugh, J. W., 1966, Mathematical simulation of marine sedimentation with IBM 7090/7094 computers, computer contribution 1, Wichita, Kansas Geological Survey, 52. 9.
- Lawrence, D. T., Doyle M. and Aigner, T., 1990. Stratigraphic modelling of sedimentary basins; concepts and calibration. *AAPGB.*, 74: 273—295.
- Sloss, L. L., 1963. Sequences in the cratonic interior of North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 74: 93—113.
- Tetzlaff, D. M., 1986. Clastic simulation model of clastic sedimentary processes. *AAPG Bull.*, Vol. 70, pp. 655.
- Vail, P. R., Mitchum, R. M. and Thompson, J., 1977. Seismic stratigraphy and global changes of sea level. *AAPGM.*, 26: 83—79.
- Van Wagoner, J. G., Posamentier, H. W., Mitchum, R. M., Vail, P. R., Sarg, J. F., Loutit, T. S. and Hardenbol, J., 1988. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. *SEPM Spec. Publ.*, Vol. 42, pp. 39—46.
- Yukler, M. A., C. Cornford and Welte, D. H. 1978. One dimensional model to simulate geologic, hydrodynamic and thermodynamic development of a sedimentary basin. *Rundschau*, Vol. 67, pp. 960—979.