

# 沉积盆地构造热演化研究进展:回顾与展望

何丽娟, 汪集旸

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘要** 构造热演化模拟是研究沉积盆地的重要手段之一,其模型依赖于沉积盆地的成因机制.裂谷盆地构造热演化的定量模型在描述盆地沉降和热流演化方面取得了极大的成功,实现了构造和热的完美结合.而前陆盆地的定量模型更多关注的是构造沉降,在构造与热的结合方面尚不够完善.关于克拉通盆地目前还没有很成熟的定量模型,构造热演化研究程度远远低于裂谷盆地和前陆盆地.随着我国陆域海相沉积盆地油气勘探的突破,对海相沉积盆地热体制的研究迫在眉睫.而我国陆域海相沉积盆地,如塔里木和四川盆地,演化历史长且复杂,是古生代海相克拉通与中、新生代前陆盆地组成的叠合盆地.现有的关于沉积盆地构造热演化的单一模式难以适应复杂的构造—热历史.对我国陆域海相大型沉积盆地进行深入全面的动力学分析,发展叠合盆地的构造—热演化模型,建立相应的构造热演化模式及模拟方法技术,将是一项具有开拓意义并极具挑战性的工作.

**关键词** 沉积盆地,构造-热演化模拟

中图分类号 P314

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)04-1215-05

## Tectono-thermal modeling of sedimentary basins: review and outlook

HE Li-juan, WANG Ji-yang

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract** Tectono-thermal modeling is one of the key methods to study the sedimentary basins, and the numerical models are dependent strongly on the dynamic mechanism of basin formation. Tectono-thermal modeling has achieved great success in describing the tectonic subsidence and heat flow of rift basins, where tectonic and thermal developments are linked perfectly. The foreland basin modeling is more concerned on tectonic subsidence rather than heat flow. There are still lack of mature models about cratonic basins, which tectono-thermal modeling is far behind from the rift and foreland basins. With the breakthrough of the petroleum exploration in marine-facies basins on land, study on their thermal regime is urgent. The marine-facies basins in China, such as the Tarim and Sichuan Basin, have experienced very long and complicated developments. They are superimposed basins by Paleozoic marine craton and Mesozoic-Cenozoic terrestrial forelands. The existed tectono-thermal models for non-superimposed basins are not applicable. Analyzing systematically the dynamics of these superimposed basins and developing appropriate numerical models for their tectono-thermal development will be a great challenge and possess innovative significance.

**Keywords** sedimentary basins, tectono-thermal modeling

### 0 引言

构造热演化模拟是研究沉积盆地的重要手段,也是恢复盆地热历史的有效方法之一.与古温标方法<sup>[1]</sup>不同的是,构造热演化模型依赖于盆地成因类型.沉积盆地构造热演化模拟必须建立在盆地成因机制分析并为之相应的地质—地球物理模型基础之

上,构造沉降史与热流演化史构成其两大核心研究内容.在理论上,构造热演化模拟依据的是基于盆地成因分析的地质地球物理模型;在方法手段上,采用的是数值方法,如有限差分或有限元法;在研究尺度范围上,它着眼于盆地形成的岩石圈尺度,因而研究的是盆地演化过程中的区域热背景<sup>[2]</sup>.中国板块自古生代以来的多次构造运动,造成

收稿日期 2007-03-10; 修回日期 2007-06-20.

作者简介 何丽娟,女,1968年生,副研究员.1990年毕业于北京大学地球物理专业,1993年于中国地质大学(北京)获硕士学位,1996年于中国科学院地质研究所获博士学位,主要从事地热学研究.(E-mail:ljhe@mail.igcas.ac.cn)

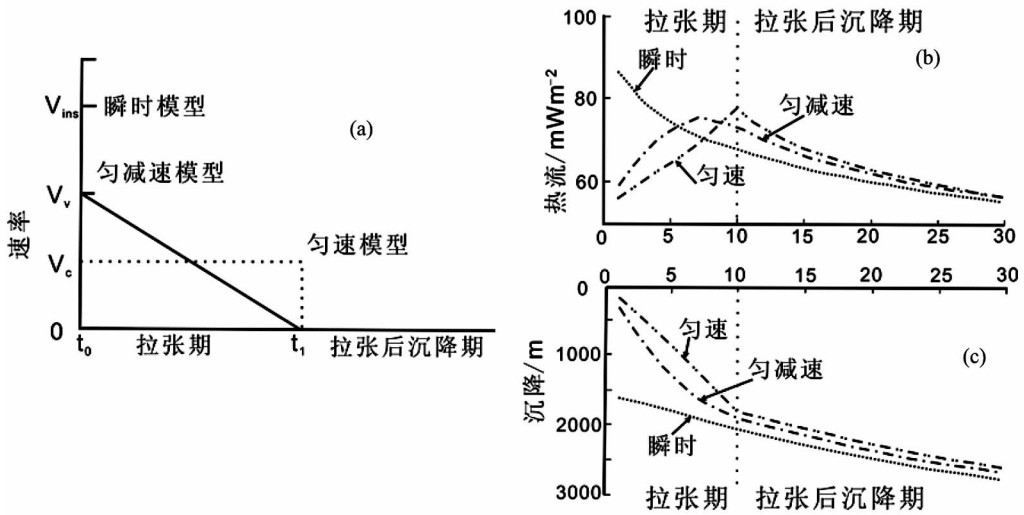


图1 几种拉张速率模式示意图(A)及其相应的热流(B)和沉降(C)随时间演化曲线.  $V_{ins}$ ,  $V_v$ ,  $V_c$  分别代表瞬时拉张的瞬时速率, 匀减速拉张的初始速率, 匀速拉张的拉张速率,  $t_0$ ,  $t_1$  分别代表拉张的初始时刻及拉张结束的时刻(据文献[9])

Fig. 1 Sketch map showing different models of extension rates (A) and corresponding evolution curves of heat flow (B) and tectonic subsidence(C)(According to [9])

了许多不同类型的沉积盆地, 具有鲜明的中国特色, 以致给盆地的分类带来许多不确定性<sup>[3]</sup>, 更给盆地的构造热演化模拟带来了不少的困难. 一般来讲, 各类原型盆地的形成与地球动力学环境有关, 可划分为裂谷盆地、前陆盆地、走滑盆地和克拉通盆地等<sup>[4]</sup>. 本文拟重点讨论不同类型盆地构造热演化模拟的研究现状、存在问题并展望未来发展趋势.

## 1 沉积盆地构造热演化模型

关于裂谷盆地构造热演化的定量模型在描述盆地沉降和热流演化方面取得了极大的成功, 实现了构造和热的完美的结合. McKenzie<sup>[5]</sup>一维瞬时均匀拉张模型作为拉张模型的代表, 在预测盆地主要观测数据方面取得了突破性的进展, 从而带动了沉积盆地定量模型的迅速发展. 该模型认为, 岩石圈的拉张在瞬时完成, 由于岩石圈减薄, 热软流圈被动上涌, 引起热扰动, 在 Airy 均衡作用下产生初始沉降. 随着时间推移, 热扰动逐渐减小, 引起热沉降. 此后, 有学者提出(纵向)非均匀拉张模型<sup>[6, 7]</sup>, 但地壳与地幔不同程度的拉张会导致几何空间问题的不协调, 因此该模型并没得到广泛认可与应用. 由于在实际情况下岩石圈的拉张不可能瞬时完成, 故有限时拉张模型<sup>[8]</sup>应运而生. 有限时拉张模型又分匀速<sup>[8]</sup>和非匀速<sup>[9]</sup>两种拉张速率模式(图 1a). 不同拉张速率模式得到的演化结果差异不大, 但所预测的演化过程却大相径庭(图 1b, c).

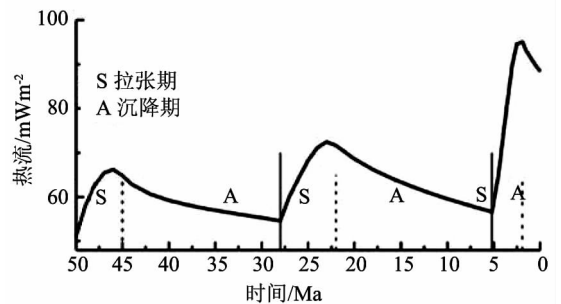


图2 多期拉张模型得到的莺歌海盆地基底热流演化曲线(据文献[18])

Fig. 2 Basal heat flow evolution of the Yinggehai Basin predicted by multistage extension model(According to [18])

我国沉积盆地往往经历多个演化阶段, 叠合盆地是我国盆地性质和演化的主要特色. 如, 中国东部新生代沉积盆地经历了多期拉张, 单期的拉张模型难以适应其构造热演化模拟的需要, 从而带动了多期拉张模型<sup>[9~18]</sup>的发展. 以莺歌海盆地为例(图 2), 盆地每拉一次, 就热一次, 整体处于逐步升温状态; 5.2 Ma 以来是盆地古地温最高时期, 约在 1.9 Ma 达到峰值; 目前盆地正处于热流下降期. 盆地三期拉张强度相当, 而基底热流却一次比一次高, 这正反映出多期拉张盆地热的继承性和叠加作用. 因此, 盆地

目前的热状态是多期拉张演化的结果,只是最后一期拉张的作用影响最大。拉张模型根据不同地区的地质-地球物理演化过程而不断的改进、完善,模型的每一步改进,都为裂谷盆地构造热演化研究增加新内容并带来了更广阔的发展空间。

前陆盆地是山系前缘与相邻克拉通之间的沉积盆地<sup>[19]</sup>,是“在前陆构造环境中冲断负荷、隆升剥蚀、挠曲沉降、沉积充填相互作用的动力学过程中形成的盆地”<sup>[20]</sup>。前陆盆地油气资源丰富,但构造变形十分复杂。描述前陆盆地沉降的定量模型很多,其中主要关键要素包括沉积/构造负荷和岩石圈挠曲。关于负荷的模型有单侧临界锥体模式<sup>[21, 22]</sup>,双侧临界锥体模式<sup>[23~25]</sup>等。关于岩石圈挠曲的模型有:弹性板模型<sup>[21, 22]</sup>,粘弹性模型<sup>[26]</sup>和弹塑性模型<sup>[27, 28]</sup>等。众所周知,岩石圈的挠曲受其流变学特征控制,而岩石圈的流变结构又与温度密切相关。然而,相对裂谷盆地而言,前陆盆地定量模型更多关注的是构造沉降,在构造与热的结合方面尚不够完善。

全球油气勘探主要从前陆盆地和/或裂谷盆地开始,然后向稳定克拉通盆地发展。中国克拉通盆地,如塔里木、鄂尔多斯和四川盆地,下伏有裂谷或坳拉谷,说明克拉通盆地随超大陆裂解而发育,其后,克拉通盆地随超大陆拼合而上叠前陆盆地<sup>[29]</sup>。相对裂谷或前陆盆地而言,克拉通盆地演化模式要复杂得多,其沉降受多种作用的控制。如,大陆岩石圈机械伸展减薄;受到热扰动大陆岩石圈的热冷却收缩;大陆岩石圈板块因重力负载及水平横向挤压而弯曲<sup>[30]</sup>等。克拉通盆地是大陆岩石圈复杂动力演化过程的产物。关于克拉通盆地目前还没有很成熟的定量模型,构造-热演化研究程度也远远低于裂谷盆地和前陆盆地。

## 2 盆山耦合的构造-热演化模拟

盆地和山岭是岩石圈动力作用(拉张和挤压)下两种主要地貌形态和地壳结构,是岩石圈变形的两个侧面。盆地与造山带之间的相互联系,主要表现在三个方面:

(1) 构造上,盆地与山岭的耦合性。主要表现在构造应力场的统一性:即挤压造山带与前陆盆地的耦合;伸展造山带与裂陷盆地耦合;走滑造山带与走滑盆地耦合。

(2) 旋回上,盆地与山岭的反转。为地球体积变化或脉动所产生,早期大陆边缘盆地可以反转为造山带,晚期造山带可以伸展坍塌成裂陷盆地,“高山

为谷,深谷为岭”主要表现在时间上的开合性。

(3) 沉积上,盆地与山岭的互补。主要为地球均衡性所致:在浅层呈现出山岭隆升侵蚀或去顶作用,盆地下降沉积充填;在深层则呈现为熔浆迁移和拆层作用<sup>[31]</sup>。关于盆山耦合的构造热演化模拟目前开展得还不很多,He and Wang<sup>[15]</sup>曾针对伸展造山带与裂陷盆地耦合的构造热演化模拟作了一些尝试,探讨了盆山耦合对裂谷盆地下伏岩石圈热动态的影响。

盆地和造山带的形成、演化,亦即大陆动力学研究的两个重要方面,在许多方面是相互依存且互为因果的,它们之间特别是其深部岩石圈存在耦合关系。造山带与盆地共存及耦合势必对盆地构造热演化产生重大影响:首先,造山带与盆地的共存,无论在时间上的同时性或非同时性,都会造成岩石圈在横向上热流变结构和强度的巨大差异,而这种差异的存在与否对盆地的形成演化具有重要的影响;其次,造山带与盆地间物质的横向迁移及其均衡响应,势必对盆地构造热演化产生影响,二者的耦合具体体现在温度场、重力均衡、地表形态、岩石圈深部结构等多方面的相互作用。所有这些都无疑对传统的沉积盆地模型提出了挑战。

## 3 存在问题与展望

目前国内的构造-热演化模拟工作多集中在中国东部的裂谷盆地<sup>[9, 12, 14, 32~35]</sup>。而前陆盆地的定量模拟一般只涉及构造沉降的模拟<sup>[36~40]</sup>,构造热演化模拟工作开展得不多。而克拉通盆地热体制的研究也主要采用的是古温标方法<sup>[3, 41~43]</sup>。

随着我国陆域海相沉积盆地油气勘探的突破,对海相沉积盆地热体制的研究提出了更高要求。而我国陆域海相沉积盆地,如塔里木和四川盆地,演化历史长且复杂,是古生代海相克拉通与中、新生代前陆盆地组成的叠合盆。以塔里木盆地为例,它是一个在前震旦纪陆壳基底上发展起来的大型前陆-克拉通叠合盆地,具有演化历史漫长、多阶段构造演化、充填层系多的特点<sup>[44, 45]</sup>。尤其台盆区经历了多期构造运动,形成三个大型古隆起,其早期构造运动及抬升剥蚀对油气藏的改造与破坏作用较为普遍。同时盆地的形成经历了震旦纪一中泥盆世、晚泥盆世—三叠纪和侏罗纪—第四纪三个伸展—聚敛旋回演化阶段。伸展期原型盆地地层层序较稳定,聚敛期原型盆地地层侧向变化大。盆地演化与构造体制转换的地球动力学过程与方式决定了盆地具有复杂的叠加

地质结构,这种具复杂演化历史克拉通盆地的构造热演化模型的建立及其构造热演化模拟,将是今后盆地构造热演化研究的主要发展方向。

#### 4 结 论

总之,沉积盆地演化的动力学过程分析一直是盆地研究领域的重点和主要发展趋势<sup>[46~48]</sup>。现有的关于沉积盆地构造-热演化的单一模式难以适用于海相沉积盆地复杂的构造热模拟,对我国陆域海相大型沉积盆地进行深入全面的动力学分析,发展叠合盆地的构造热演化模型,建立适用于我国海相沉积盆地的构造热演化模式,并应用计算机技术定量模拟以揭示盆地热体制,是一项具有战略意义并极具开拓性的工作。

#### 参 考 文 献 (References):

- [1] 胡圣标,汪集旸. 沉积盆地地热体制的研究方法原理和进展[J]. 地学前缘, 1995,2:171~179.
- [2] 何丽娟. 沉积盆地构造热演化模拟的研究进展[J]. 地球科学进展, 2000,15:661~665.
- [3] 张水昌,梁狄刚,张宝民,等. 塔里木盆地海相油气的生成[M]. 北京:石油工业出版社, 2004.
- [4] 刘和甫,李晓清,刘立群,李小军,胡少华. 成藏区带地球动力学与远景圈闭[J]. 地学前缘, 2005,12:468~479.
- [5] McKenzie D P. Some remarks on the development of sedimentary basins[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1978,40:25~32.
- [6] Hellinger S J, Sclater J G. Some comments on two-layer extension models for the evolution of sedimentary basins[J]. J. Geophys. Res., 1983,88:8251~8269.
- [7] Rowley D B, Sahagian D. Depth dependent stretching: a different approach[J]. Geology, 1986,14:32~35.
- [8] Jarvis G T, McKenzie D P. Sedimentary basin formation with finite extension rates[J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1980,48:42~52.
- [9] 何丽娟. 辽河盆地新生代多期构造热演化模拟[J]. 地球物理学报, 1999,42:75~82.
- [10] Keen C E, Dehler S A. Stretching and subsidence: rifting of conjugate margins in the North Atlantic region[J]. Tectonics, 1993,12:1219~1229.
- [11] Dehler S A, Keen C E, Rohrt K M. Tectonic and thermal evolution of Queen Charlotte basin: lithospheric deformation and subsidence models[J]. Basin Research, 1997,9:243~261.
- [12] 何丽娟,熊亮萍,汪集旸. 沉积盆地多期拉张模拟中拉张系数的计算[J]. 科学通报, 1995,40:2261~2263.
- [13] 何丽娟,熊亮萍,汪集旸. 拉张盆地多期构造热演化模拟中的影响因素[J]. 地质科学, 1998,33:125~131.
- [14] 何丽娟,熊亮萍,汪集旸,等. 莺歌海盆地构造热演化模拟研究[J]. 中国科学(D), 2000,30:415~419.
- [15] He L, Wang J. Cenozoic thermal history of the Bohai Bay Basin: constraints from heat flow and coupled basin-mountain modeling[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2003,28:421~429.
- [16] He L, Wang J. Tectono-thermal modeling of sedimentary basins with episodic extension and inversion, a case history of the Jiyang Basin, North China[J]. Basin Research, 2004,16:587~599.
- [17] He L, Wang K, Xiong L, Wang J. Heat flow and the thermal history of the South China Sea[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2001,126:211~220.
- [18] He L, Xiong L, Wang J. Heat flow and thermal modeling of the Yinggehai Basin, South China Sea[J]. Tectonophysics, 2002,351:245~253.
- [19] Dickinson W R. Plate tectonics and sedimentation. Plate Tectonics and Sedimentation[J]. Tulsa: Spec. Publ. Soc. Econ. Geol., 1974,22:12~27.
- [20] 何登发,李德生. 沉积盆地动力学研究进展[J]. 地学前缘, 1995,2:53~58.
- [21] Flemings P B, Jordan T E. A synthetic stratigraphic model of foreland basin development[J]. J. Geophys. Res., 1989,94:3851~3866.
- [22] Sinclair H D, Coakley B J, Allen P A, Watts A B. Simulation of foreland basin stratigraphy using a diffusion model of mountain belt uplift and erosion: an example from the central Alps, Switzerland[J]. Tectonics, 1991,10:599~620.
- [23] Dahlen F A, Suppe J, Davis D. Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges; cohesive Coulomb theory[J]. J. Geophys. Res., 1984,89:10087~10101.
- [24] Beaumont C, Fullsack P, Hamilton J, Willett S. Preliminary results from a mechanical model of the tectonics of compressive crustal deformation. Alberta Basement Transects[R]. Workshop Report. Vancouver: Lithoprobe Secretariat. University of British Columbia, 28:21~61., 1992.
- [25] Willett S D, Beaumont C, Fullsack P. Mechanical model for the tectonics of doubly vergent compressional orogens[J]. Geology, 1993,21:371~374.
- [26] Beaumont C. Foreland basins[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1981,65:291.
- [27] Garcia-Castellanos D M, Fernández, M. Torne. Numerical modeling of foreland basin formation: A program relating thrusting, flexure, sediment geometry and lithosphere rheology[J]. Comput. Geosci., 1997,23:993~1003.
- [28] Garcia-Castellanos D M, Fernández, M. Torne. Modeling the evolution of the Guadalquivir foreland basin (southern Spain)[J]. Tectonics, 2002,21:1018.
- [29] 刘和甫,李景明,李晓清,刘立群,李小军,胡少华. 中国克拉通盆地演化与碳酸盐岩-蒸发岩层序油气系统[J]. 现代地质, 2006,20:1~18.
- [30] 刘波,钱祥麟,王英华. 克拉通盆地类型及成因机制综述[J]. 地质科技情报, 1997,16:23~28.
- [31] 刘和甫. 盆地-山岭耦合体系与地球动力学机制[J]. 地球科

- 学—中国地质大学学报, 2001, 26: 581~596.
- [32] 王良书, 施央申. 油气盆地地热研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 1989.
- [33] 林畅松, 张燕梅. 拉伸盆地模拟理论基础与新进展[J]. 地学前缘, 1995, 2: 79~88.
- [34] 张功成, 徐宏, 周章保, 等. 裂陷盆地构造-热演化模拟[J]. 石油实验地质, 1998, 20: 49~54.
- [35] 史卜庆, 田在艺, 周瑶琪, 等. 伸展盆地地表热流值的模拟计算[J]. 地质论评, 2003, 49: 101~106.
- [36] 刘少峰. 前陆盆地挠曲过程模拟的理论模型[J]. 地学前缘, 1995, 2: 69~77.
- [37] 周总瑛, 蒋泰然, 吴乃苓. 前陆盆地挠曲沉降定量分析[J]. 石油地球物理勘探, 1996, 31: 699~704.
- [38] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.
- [39] 贾承造, 等. 塔里木盆地中新生代构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [40] 刘光祥, 钱一雄, 潘文蕾. 库车中、新生代前陆盆地沉降-沉积分析[J]. 石油实验地质, 2000, 22: 313~318.
- [41] 解启来, 周中毅. 利用干酪根热解动力学模拟实验研究塔里木盆地地下古生界古地温[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2002, 27: 767~769.
- [42] 王飞宇, 张水昌, 张宝民, 等. 塔里木盆地寒武系海相烃源岩有机成熟度及演化史[J]. 地球化学, 2003, 32: 461~468.
- [43] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [44] 贾承造, 等. 塔里木盆地板块构造与大陆动力学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [45] 何登发, 贾承造, 李德生. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26: 64~77.
- [46] 李思田. 沉积盆地的动力学分析[J]. 地学前缘, 1995, 2: 1~8.
- [47] 李思田. 盆地动力学与能源资源-世纪之交的回顾与展望[J]. 地学前缘, 2000, 7: 1~9.
- [48] 滕吉文. 当今中国岩石圈物理学研究中的几个重要问题与思考[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1033~1042.