

文章编号: 1009-6248 (2002) 02-0009-06

拉伸盆地动力学定量模拟研究的进展及趋势

阎小雄, 周立发

(长庆油田勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 拉伸盆地作为一种重要的盆地类型一直受到重视, 定量动力学模拟是一种迅速兴起并发展起来的一种盆地分析的方法。笔者主要介绍了: (1) 拉伸盆地的沉降机制。(2) 拉伸盆地的定量动力学模型。(3) 拉伸盆地定量动力学模拟的实现方法。(4) 拉伸盆地定量动力学模拟过程中的不确定性, 从而使人们对这一领域有一个清晰的认识和了解, 促进这一领域的研究和发展。

关键词: 拉伸盆地; 沉降机制; 动力学模型; 定量模拟; 不确定性

中图分类号: P54

文献标识码: A

盆地动力学是地球动力学的一个分支, 而盆地的定量动力学模拟是盆地动力学研究的重要组成部分。盆地动力学模拟是用地质和地球物理等最基本的原理来描述、研究和表达地球动力学过程中最本质的关系^[1]。盆地定量动力学模拟作为一种新兴的盆地分析的方法和手段, 正在迅速发展, 其理论基础、地质(理论)模式、数理模型及其模拟方法也日趋完善。拉伸盆地作为一种重要的盆地类型和其中蕴含的丰富油气资源, 一直受到人们的重视。其中, 拉伸盆地的定量动力学研究在 20 世纪 60 年代就开始, 到目前已形成比较完善的理论体系和模拟基础^[2], 同时定量模拟方法也逐渐成熟, 为拉伸盆地的研究、分析及油气资源评价提供了一种可靠的方法和途径。

1 拉伸盆地的沉降机制

拉伸盆地是张力系统下形成的盆地, 一般位于板块边部, 由于软流圈隆升使岩石圈伸展、变薄或由于板内应力使岩石圈伸展而形成盆地^[3]。

沉降是盆地形成的前提, 盆地形成和演化分析首先要研究探讨盆地的沉降机制。拉伸盆地的沉降主要与下列作用有关:

1.1 岩石圈的拉薄作用

拉伸盆地是在岩石圈受到拉伸发生变薄时形成的 (Ziegler, 1992)。岩石圈变薄所产生的空间大小主要取决于岩石圈被拉伸前的厚度和变薄程度或拉伸量的大小。岩石圈的变薄可通过纯剪切和简单剪切两种基本的机制来实现^[2]。

收稿日期: 2001-06-08; **修回日期:** 2001-10-08

作者简介: 阎小雄 (1971-), 男, 陕西礼泉人, 硕士研究生, 现从事天然气勘探方面的研究工作。

1.2 热衰减作用

岩石圈受到拉伸变薄时, 由于软流圈的上隆导致了高的热异常。拉伸停止后的热衰减被认为是裂谷期后盆地沉降的主要驱动机制。裂谷期后盆地热衰减沉降是由于岩石圈拉伸停止后, 岩石圈不断冷却、密度加大所导致均衡调整的结果。其沉降机制与现代洋中脊两侧的洋壳冷却沉降过程可类比, 沉降大小主要与拉伸程度引起的热异常和随后的冷却时间有关 (McKenzie, 1978)^[4]。

1.3 沉积物负载的均衡沉降

充填盆地的水体或沉积物负载引起岩石圈的均衡调整是造成盆地沉降的一个不可忽视的因素。当构造沉降 Y (水载盆地) 的盆地被沉积物充填时, 盆地总沉降 S 为:

$$S = Y(\rho_m - \rho_w) / (\rho_m - \rho_s) \quad (1)$$

ρ_m 、 ρ_w 、 ρ_s 分别为上地幔、水和沉积物的密度。根据均衡论, 均衡沉降量应与盆地的总沉降量一致。

由于岩石圈具有一定的刚度, 在加载后出现的响应是挠曲均衡 (Watts, 1982)。当水平应力为零且热衰减作用可以忽略不计时, 挠曲均衡造成的沉降可由下式得出:

$$D \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + (\rho_c - \rho_m) g \omega = P(x) \quad (2)$$

其中, ω 为挠曲均衡的垂向沉降, $P(x)$ 为重力负荷, g 为重力加速度, ρ_c 和 ρ_m 分别代表地壳和上地幔的密度。 D 为挠曲刚度:

$$D = \frac{Y T_e^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

其中, Y 是杨氏模量, ν 为泊松比, T_e 为地壳的有效弹性厚度。

另外, 地壳深部变质作用, 板内应力作用也是控制盆地沉降的因素。

2 拉伸盆地的定量动力学模型

McKenzie (1978)^[4]最先提出盆地的拉伸作用及其下面岩石圈响应的定量动力学模型, 确定拉伸指数与盆地沉降和盆地热演化的定量关系, 开辟了盆地定量动力学研究的新领域。拉伸盆地的定量动力学模拟是非常活跃的研究领域。目前已经提出了不少于 5 种定量模型 (林畅松, 1995)^[2], 主要的模型是: ①均匀纯剪切拉伸模型。②非均匀纯剪切拉伸模型。③简单剪切模型。④简单剪切-纯剪切挠曲悬臂梁模型。⑤拆离-纯剪切模型。纯剪切模式及简单剪切模式是基本的端元机制, Friedmann 提出了基于这两个端元的拉伸盆地类型, 即纯剪切机制下的裂谷盆地和简单剪切机制下的拆离盆地。本文限于篇幅, 只介绍两个端元模型。

2.1 岩石圈纯剪拉伸模型

岩石圈纯剪拉伸模式大致分为均匀的纯剪切拉伸模型和非均匀的纯剪切拉伸模型。McKenzie 提出的拉伸模型是均匀纯剪切模型, 该模型提出了初始沉降和热衰减后均衡沉降的基本方法。初始沉降 (S_i) 反映了地壳拉伸和地幔减薄的置换过程, 地壳拉伸导致盆地沉降, 地幔岩石圈减薄导致盆地抬升。在不考虑拉伸期的热扩散的前提下, 盆地的初始沉降表达如下:

$$S_i = \frac{\alpha[(\rho_0 - \rho_c) \frac{t_c}{\alpha} (1 - \frac{\alpha \sqrt{T_1 t_c}}{\alpha}) - \frac{\rho_0 \alpha \sqrt{T_1}}{2}] (1 - \frac{1}{\beta})}{\rho_0 (1 - \alpha \sqrt{T_1}) - \rho_w} \quad (4)$$

其中, a 为岩石圈厚度, ρ_0 为岩石圈岩石密度, t_c 为地壳原始厚度, α 为热膨胀体积系数, T_1 为岩石圈底面温度, β 为拉伸系数, ρ_w 和 ρ_c 分别为水和地壳密度。

热衰减沉降 $S_{T(t)}$ 由下式给出:

$$S_{T(t)} = \frac{4\rho_0 \alpha \sqrt{T_1} \alpha}{\pi^2 (\rho_0 - \rho_w)} \left[\frac{\beta}{t} \sin\left(\frac{\pi}{\beta}\right) \right] [1 - \exp(-\frac{t}{\tau})] \quad (5)$$

其中, τ 为热时间, t 为受热时间, 其余符号同上。但是, 这一公式只是一项近似公式, 适合 $\beta < 4$ 或 $\beta > 4$ 且 $t > 20 M a_0$ 。

盆地沉降量 (S_i) 是初始沉降量和热衰减后沉降量的总和, 即:

$$S_i = S_i + S_{T(t)} \quad (6)$$

非均一的纯剪模型是 Royden 和 Keen (1980) 在研究 Scotia 和 Labrador 大陆边缘盆地时提出的。Royden 和 Keen 根据研究的实际情况提出了双层非均一的纯剪拉伸模型, 认为岩石圈在受到拉伸时岩石圈的上部和下部受到的拉薄程度是不同的, 前者的大小主要控制着盆地裂陷期的沉降量, 后者则主要影响着盆地的热流异常和热衰减沉降的大小。构造沉降量 S 可由下式计算:

$$S = (\rho_m - \rho_c) / (\rho_m - \rho_w) t_c (1 - 1/\beta_c) - \alpha \rho_m r T_1 / 2 (\rho_m - \rho_w) \alpha (1 - 1/\beta_m) \quad (7)$$

β_c 为地表拉伸系数, β_m 为上地幔拉伸系数。

但是, 双层不均一拉伸模型的上、下之间必须存在拆离的不连续面, 同时拉伸量的不同产生了解释的空间问题。为了解决这一问题, Rowley 等 (1986) 提出了连续的非均一纯剪拉伸模式, 提出拉伸应变是随深度变化的, 随深度应变分布的范围加大, 及无需不连续面的存在, 也无空间不守恒问题。岩石圈深部的拉伸范围大于地壳上部的拉伸范围, 深部热衰减造成的盆地沉降超出上部裂陷范围, 地层向断陷两侧上超, 坳陷盆地叠置在“牛头”式裂陷盆地之上^[1]。

2.2 岩石圈的简单剪切模式

根据地球物理和地面地质资料, Wernicke (1985) 用简单剪切模式对美国“盆岭省”的断陷盆地作了动力学解释。该地区的资料表明, 断陷盆地的下部不存在软流圈上隆, 相反软流圈隆起部位却远离地壳拉伸部位, 因而纯剪切拉伸模式不能解释。为了解决这一问题, 在经过仔细研究后, Wernicke 对“盆岭省”的地质地球物理现象作出如下解释: 整个地壳在中第三纪向东倾斜的简单剪切带, 由于该带倾角小, 拉伸区跨度大, 据剪切深度和沉降历史的差异划分出 3 个带: 第一个带限于地壳拉伸, 而地幔岩石圈没有拉伸, 沉降作用发生在裂谷期之后, 发育一系列高角度断层, 形成一系列不对称的掀斜盆地; 第二个带地壳和地幔同时拉伸, 地壳和地幔同时发生减薄作用, 该带出现在由沉降到隆起的过渡带; 第三个带由于仅发生地幔减薄作用, 因此断裂期间出现显著的抬升而形成地貌上的穹隆, 该穹隆的剥蚀夷平造成地壳减薄, 导致热衰减沉降, 其幅度超过断裂期间的抬升幅度。形成负地形^[1]。这就是岩石圈的简单剪切模式。不过, 该模式还有待于用深地震剖面来证实和检验。

以上介绍了纯剪切和简单剪切的两个端元模式。其实, 大陆岩石圈变形往往介于这两个

端元模式之间,同时,挠曲均衡作用、重力均衡作用也起重要作用。因此,就象 Armstrong (1982) 所说的,纯剪切和简单剪切应变可能在同一伸展带中同时出现,两个概念并非互相排斥。就此说明拉伸模型实际上要复杂得多。

3 拉伸盆地定量动力学模拟的方法

目前,盆地定量动力学模拟重点放在分析和解决地质问题上,对于拉伸盆地,广泛采用正、反演相结合的方法,估算盆地拉伸系数,根据拉伸系数的时空分布,重塑盆地形成的动力学过程,定量分析盆地的深部结构和热演化历史 (White 等, 1992; Kusznir 等, 1992)。

具体过程是采用回剥法,从地层记录中反演盆地的沉降史,定量得出盆地构造沉降量,再应用合适的正演模型拟合沉降量,估算盆地拉伸 β 值,从而重塑盆地形成过程 (Keen, 1993)。

3.1 回剥法

回剥法是定量研究盆地沉降史的一种较成熟的分析方法。由于盆地的总沉降是构造沉降、沉积物和水负载的均衡沉降、沉积物压实、海平面变化的综合结果。回剥法的一个主要目的就是 from 盆地总沉降量中区分出构造沉降量,同时必须对古水深、沉积物压实和沉积物负载等的沉降进行校正。

沉积物的压实过程受岩性、超压、成岩作用等因素影响,但岩性往往起主导作用,在正常压实作用下,孔隙度和深度服从指数分布:

$$\phi = \phi_0 \cdot e^{-c \cdot Y} \quad (8)$$

其中, ϕ 为深度为 Y 时的孔隙度, ϕ_0 为地表孔隙度, c 为压实系数。当沉积物中泥质含量较高时, (8) 式与实际情况接近。在浅部,深度与孔隙度的关系应用下式计算拟合更好:

$$\phi = 1/(1/\phi_0 + c \cdot Y) \quad (9)$$

在一定深度上岩层厚度由下式给出:

$$Y_2 - Y_1 = Y_2 - Y_1 + \phi_0 \frac{(e^{-c \cdot Y_2} - e^{-c \cdot Y_1})}{c} + \phi_0 \frac{(e^{-c \cdot Y_1} - e^{-c \cdot Y_2})}{c} \quad (10)$$

古水深可以通过对沉积相和古生物组合分析后估算,或者利用地震剖面进行分析估计。考虑诸因素,并从二维剖面上计算,构造沉降 $Y(x)$ 为:

$$Y(x) = C[S(x)] \frac{\rho_m - \rho_s(x)}{\rho_m - \rho_w} - W d(x) \frac{\rho_w(x)}{\rho_m - \rho_w(x)} + [W d(x) - SL] \quad (11)$$

其中 C 为均衡比值, $S(x)$ 是校正后的厚度, $\rho_s(x)$ 为沉积物平均密度,古海平面高度为 SL , 古水深为 $W d(x)$ 。

3.2 正演模拟

用回剥法求得构造沉降后,可利用正演的拉伸模型求解拉伸指数 β 的大小。当构造沉降 Y 为同裂谷期沉降时,由 McKenzie 的模式得:

$$\beta = S_0 \left(\frac{1}{S_0 - Y} \right) \quad (12)$$

S_0 为 β 趋近无穷的最大沉降值,其大小取决于拉伸前岩石圈的厚度。

同样, 若已知裂后的热衰减沉降, 可由下式计算 β 值:

$$E(t) = \frac{a\rho_0\alpha T_1}{\rho_0 - \rho_w} \left\{ \frac{4}{\pi^2} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2\pi} \frac{\beta}{(2m+1)} \sin \frac{(2m+1)\pi}{\beta} \exp \left[- (2m+1)^2 \frac{t}{J} \right] \right\} \quad (13)$$

其中, $J = a^2/\pi^k$ 。

但在盆地充填中, 裂后不整合面有时不易准确确定, 就需要用总的构造沉降来计算, 即对整个盆地的充填进行回剥计算, 所得的构造沉降为同裂陷期和裂后期热衰减沉降的总和:

$$Y = S(\beta) + Sth(\beta, t) \quad (14)$$

应用迭代法很容易得到 β 值的大小, 从而可以计算出拉伸量 E 、软流圈的埋藏、热流值等参数, 通过与实际观察数据比较, 建立起定量的动态盆地演化模式^[2]。

4 定量动力学模拟中的不确定性

拉伸盆地定量动力学模拟是一个庞大而复杂的系统工程, 整个过程中不确定性因素无处不在。其不确定性因素来源较多, 主要来自以下几个方面。

(1) 地质模型的不确定性。由于模拟过程中使用的数理模型是从地质模型中提炼出来的, 地质模型本来就简化了实际岩石圈地质变化过程, 其中包含了一定的不确定性因素的理想化模型, 因而地质模型的不确定性会通过数理模型在最终模拟结果上表现出来。

(2) 相关理论的不确定性。

(3) 所使用资料的不确定性。由于现代定量模拟中的资料精度有限, 包含一定的精度差异, 从而给模拟结果带来不确定性。

(4) 前提假设和实际的偏离。模拟地球动力学机制时总是纯化模拟的前提, 希望达到预期的结果, 从而造成与实际情况发生偏离, 造成不确定性因素的产生。

(5) 近似计算。模拟计算时, 由庞大的数据体和复杂的计算方程, 需获得精确的解往往是很困难的。为了适应现有计算能力和缩短计算时间可能需要简化计算公式, 并可能使用快速计算方法, 简化过程就会给计算结果带来误差, 添加了模拟过程和结果的不确定性^[1, 5~11]。

总之, 盆地模拟的不确定性是来自各个方面。因而需要我们从模拟的理论基础、地质模型、数理模型、计算方法等方面进行消除, 也就是说我们应该进一步加深它们的研究, 争取对它们有进一步的了解。同时, 在进行盆地动力学模拟时, 要分析模拟中不确定性的来源和作用, 并尽可能对不确定性作出评价, 弄清它们对模拟结果的影响, 进而减少不确定性因素的影响, 提高模拟结果的精确性^[12]。

5 结语

拉伸盆地的定量动力学模拟是盆地分析、盆地动力学研究的重要内容之一。由于拉伸盆地在沉积盆地中的重要性, 应该大力加强其定量动力学模拟的研究。根据我国的实际情况, 应该加强从物理模拟到数值模拟, 从一维模拟到三维动态模拟, 从描述模型到分析模型的转化和研究, 使盆地定量动力学模拟逐步走向完善, 提高定量动力学模拟的适用性; 同时, 应该重视盆地模拟中反演技术的发展和不确定性问题等方面的研究, 借助我国得天独厚的地理条

件和迅猛发展的现代计算机技术, 使我国的盆地定量动力学研究取得重大突破。

参考文献

- [1] 王龙樟, 徐强. 沉积盆地定量动力学模拟 [J]. 岩相古地理, 1998, 18 (6): 48-60.
- [2] 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 (3~4): 79-88.
- [3] 王东坡, 刘立, 等. 沉积盆地形成的地球动力学机制及其分类 [J]. 岩相古地理, 1998, 18 (3): 7-13.
- [4] McKenzie D. Some remarks on the development of sedimentary basin [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1978, 40: 25-32.
- [5] 林畅松, 刘景彦, 等. 沉积盆地动力学与模拟研究 [J]. 地学前缘, 1998 (增刊): 119-125.
- [6] 李思田. 沉积盆地的动力学分析——盆地研究领域的主要趋向 [J]. 地学前缘, 1995, 2 (3~4): 1-8.
- [7] 何登发, 李得生. 沉积盆地动力学研究的新进展 [J]. 地学前缘, 1995, 2 (3~4): 53-58.
- [8] 孙永传, 陈红汉. 石油地质动力学的内涵与展望 [J]. 地学前缘, 1995, 2 (3~4): 9-14.
- [9] 刘和甫. 沉积盆地地球动力学分类及构造样式分析 [J]. 地球科学, 1993, 18 (6): 699-724.
- [10] 陈发景, 汪新文. 含油气盆地地球动力学模式 [J]. 地质论评, 1996, 42 (4): 304-309.
- [11] 何丽娟, 熊亮萍, 等. 拉张盆地构造热演化模拟的影响因素 [J]. 地质科学, 1998, 33 (2): 222-227.
- [11] 杨小平, 等. 层序地层学研究现状及发展趋势 [J]. 西北地质, 2001, 34 (2): 16-20.

Quantitative dynamics and modeling of extensional basin

YAN Xiao-xiong, ZHOU Li-fa

(Research Institute of Petroleum E & D, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China)

Abstract: The extensional basin is an important basin style and has been carefully studied by people. The quantitative dynamics and modeling is a kind of methods in basin analysis. The paper briefly introduces ① the subsidence mechanism of extensional basin ② the brief quantitative dynamics models of extensional basin ③ the quantitative modeling methods of extensional basin ④ the uncertainty in quantitative modeling.

Key words: extensional basin; subsidence mechanism; dynamics model; quantitative modeling; uncertainty