

10 ± Ma——伸展盆地裂陷旋回的重要周期

史卜庆¹⁾ 周瑶琪²⁾ 窦立荣¹⁾ 刘继国³⁾ 刘海玲⁴⁾ 黄盛波⁵⁾

(1) 中国石油勘探开发研究院海外研究中心, 北京, 100083; (2) 石油大学地球化学与岩石圈动力学实验室, 山东 东营 257061; (3) 中国地质大学, 北京, 100083; (4) 中国石化中原油田分公司技术监测中心, 河南 濮阳 457001; (5) 中国石化中原油田分公司地质院, 河南 濮阳 457001)

摘要 沉积盆地的发展演化过程往往表现为旋回性和周期性。根据部分典型大陆裂陷盆地的伸展沉降史分析结果, 认为 10 ± Ma 应该是一个重要的旋回周期, 这一周期的控制因素更可能与深部软流圈的脉动性隆升有关。通过理想情况下的盆地非稳态古地温场的模拟计算, 发现软流圈上涌作用 10 ± Ma 之后, 岩石圈温度场便基本达到稳定, 造成了岩石圈减薄、盆地沉降以及岩浆作用达到相对平衡, 从而使软流圈发生热回沉或进一步上涌。因此软流圈的脉动式上涌造成了裂陷盆地的幕式沉降过程, 这一周期可能在 10 ± Ma 左右, 并因具体的动力学参数的差异而略有不同。而伸展裂陷幕的次数也与软流圈的上涌次数以及板块的边界应力场密切相关。

关键词 伸展盆地 裂陷 旋回 地温场 模拟计算

10 ± Ma: An Important Geological Cycle of Rifting and Subsiding in Extensional Basins

SHI Buqing¹⁾ ZHOU Yaoqi²⁾ DOU Lirong¹⁾ LIU Jiguo³⁾ LIU Hailing⁴⁾ HUANG Shengbo⁵⁾

(1) Overseas Research Center, Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing, 100083; (2) Open Laboratory of Geochemistry & Lithosphere Dynamics, University of Petroleum, Dongying, Shandong, 257061; (3) Department of Energy, China University of Geosciences, Beijing, 100083; (4) Technique Monitoring Center of Zhongyuan Oil Field, SINOPECP, Puyang, Henan, 457001; (5) Exploration & Development Research Institute of Zhongyuan Oil Field, SINOPECP, Puyang, Henan, 457001)

Abstract The evolution of sedimentary basins is always periodical and episodic. According to the analytical results of extension and subsidence history of some typical rift basins in the world, this paper suggests that 10 ± Ma should be an important cycle during basin rifting, which is probably controlled by the pulsating upwelling of asthenosphere. In order to study the effect of asthenosphere upwelling pulsation on rifting cycle, this paper has established an ideal pure shear model to simulate the variation of 2-D unsteady geotemperature field on the scale of lithosphere. The results show that the lithosphere temperature field becomes gradually stable after 10 ± Ma of asthenosphere upwelling, which causes a relative balance in the system of lithosphere stretching, basin subsiding and magmatism, and provides a background for another rifting cycle or thermal subsiding. Therefore, the 10 ± Ma of rifting cycle is controlled by asthenosphere upwelling process and corresponding physical-thermal evolution, which may be somewhat diverse according to actual geodynamic parameters.

Key words extensional basin rifting cycle geotemperature field numerical simulation

在地球动力学研究中, 旋回、节律或周期等是地质事件的重要分析内容(王鸿祯, 1997; 周瑶琪等, 1997)。对于伸展盆地的动力学研究也不例外, 这对于分析沉积盆地尤其是陆相裂谷盆地的层序地层、构造演化以及生储盖组合的变迁过程具有重要的意义。笔者通过理想情况下的伸展盆地非稳态古地温

场的模拟计算, 认为 10 ± Ma 是伸展盆地重要的旋回周期, 其与深部动力学条件具有密切的内因联系。

1 伸展盆地的幕式沉降特征

近年来, 伸展盆地的幕式沉降或波动性已经得到了越来越多的揭示(焦养泉等, 1996; 任建业等,

1996 李京昌等,1997;张一伟等,1997;李思田等,1998)。其中 $10 \pm \text{Ma}$ 也是一个明显的演化周期,但对于不同盆地却存在不同的解释,如李京昌等(1997)认为柴达木盆地第三系的 $10 \pm \text{Ma}$ 周期主要是青藏高原的隆起与挤压过程造成的。张一伟等(1997)认为 $10 \pm \text{Ma}$ 的周期在中国东、西部典型沉积盆地的演化明显存在,并认为可能对应于周期大约为 12 Ma 的太阳能量周期。

事实上,只有将揭示出的不同周期纳入相同的地球动力学背景中才能得出本质的控制因素。地球物理资料表明,软流圈上涌引起的盆地滑脱、伸展以

及火山岩浆活动在环太平洋带、东非和西北欧非常发育(陆现彩等,1998)。笔者根据全球部分典型裂谷的伸展沉降史分析结果,发现 $10 \pm \text{Ma}$ 的周期在裂谷的伸展裂陷阶段确实存在(图1、表1)。裂谷的多幕裂陷作用相应形成了幕式沉降和沉积旋回以及多幕岩浆活动。近年来,愈来愈多的地质学家们注意到伸展盆地的形成、演化与深部过程之间存在的耦合关系,即伸展盆地的形成与深部的岩石圈拉伸减薄和软流圈上涌有关,并伴随着显著的沉降和岩浆作用。其中软流圈上涌是板块相互作用的深部调整过程,同时也是地壳表层与地幔进行重力均衡调

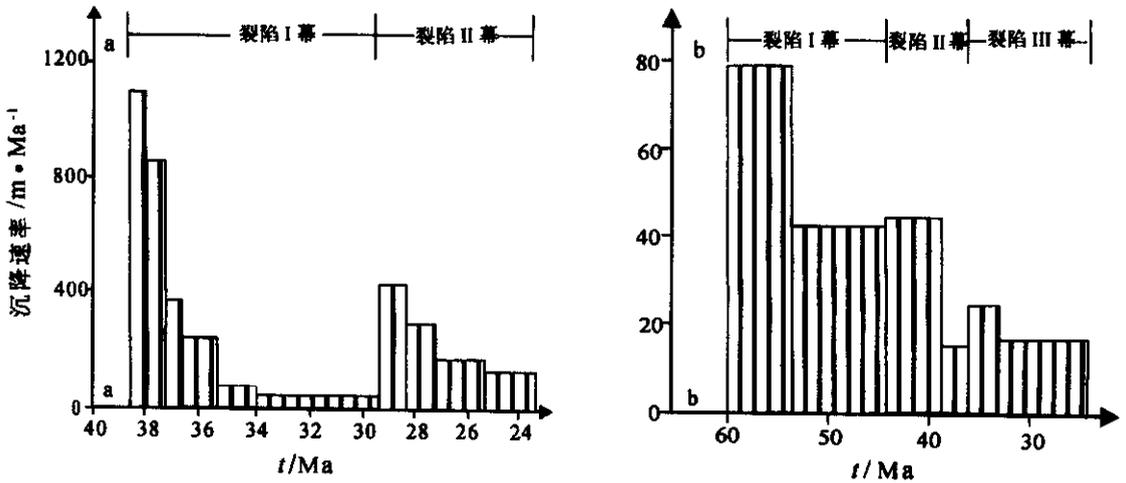


图1 渤海湾盆地早第三纪基底构造沉降速率直方图

Fig. 1 Subsidence rate of base in Bohai Bay basin during Eogene, indicating several rifting episodes and rapid subsidence
a-渤海湾盆地南堡坳陷老第三纪断陷盆地(据焦养泉等,1996) b-渤海湾盆地济阳坳陷老第三纪断陷盆地

表1 全球部分典型裂谷盆地的伸展裂陷幕时限统计表

Table 1 The intervals of extension and subsidence episodes in part of typical rift basins in the world

盆地名称	伸展裂陷幕/个	伸展裂陷时限/Ma	平均值/Ma	资料来源
北部湾盆地	3	10.4~13	11.6	李思田等,1998
莺歌海盆地	4	6~12.5	9.95	李思田等,1998
琼东南盆地	3	6~12.5	10.5	李思田等,1998
珠江口盆地	4	6~12	9.6	李思田等,1998
南堡坳陷	2	7~9	8	焦养泉等,1996
二连盆地	3	4~7	6	任建业等,1996
辽河盆地	3	7~10	—	郑荣才等,2001
济阳坳陷	3	8.5~16	12	本文
印尼 Kutai 盆地	1	10	10	Mccay 等,2000
巴西 Campos 盆地	2	10~13	11.5	Mohriak 等,1989
Suez 湾盆地	1	9.5	9.5	Mark 等,1988
南美 Andean 盆地	2	6.8~8	7.4	Sempere 等,1997

整的过程,因此,其阶段性活动肯定与盆地的幕式沉降存在必然的成因联系。因此伸展盆地中 $10 \pm \text{Ma}$ 的裂陷旋回周期不是单纯的数字巧合,本文试图从动力学角度分析其成因。即根据非稳态热传导作用的基本原理,通过建立理想情况下的岩石圈尺度的地温场模型,对不同软流圈上涌程度和岩石圈拉伸因子条件下的岩石圈古地温演化进行了模拟,得到了与事实吻合较好的结果。

2 伸展盆地岩石圈尺度的二维非稳态古地温场正演模拟

传热学理论认为,物质的传热不随时间而变化的温度场为稳态温度场,而随时间变化的温度场为非稳态的温度场。因此对于伸展盆地的古地温场演化而言就应具有非稳态传热的性质。经典的伸展盆地模型假设伸展盆地在裂陷过程中的热流值呈瞬时性增加,之后相对稳定(Mckenzie,1978)。事实上诸

多伸展盆地内的古温度场并非瞬时增加,而是具有幕式伸展裂陷的特点,并且每个伸展幕内存在一个古温度场由非稳态逐渐向稳态变化的过程。研究进行模拟计算的目的在于考察这种变化过程的周期以及对盆地演化的控制作用。

2.1 正演模型的建立

在沉积盆地热演化研究中,岩石圈尺度上的“构造热演化法”是一条基本途径(胡圣标等,1995),即调整盆地的动力学模型来拟合盆地的实际构造沉降量,从而得到盆地底部热流史、埋藏史和沉积地层的热历史,是一种正演方法。由于重点考察岩石圈古温度场的演化特征,因此建立的模型是否与盆地的实际构造沉降的拟合程度并不重要,而关键在于模型本身所反映出的深部动力学背景。

由于典型的伸展裂谷盆地一般受深部的软流圈上涌和岩石圈减薄作用的控制,因此可以建立一个受上述因素影响的理想纯剪切模型来计算岩石圈尺度上的古地温场变化(图2)。假设软流圈上涌呈正弦曲线状,给定岩石圈厚度 l 、软流圈顶面势温度 T_m 以及上涌幅度 A ,则岩石圈伸展因子 $\beta = l/(l - A)$ 。模型的横向边界条件为:

$$q_{x,y} = -k \frac{\partial T}{\partial x,y} \Big|_{x_0,y_0} = 0$$

即穿过盆地周边的水平热流为零。

垂向边界条件为:

1) $T|_{\Omega_1} = T_{s0} = 13^\circ\text{C}$,即古地表温度不变;

2) $q|_{\Omega_2} = q(x_0, y_0, z_0)$,即盆地底部热流;或

$T|_{\Omega_2} = T_m = 1333^\circ\text{C}$,即软流圈顶面势温度。

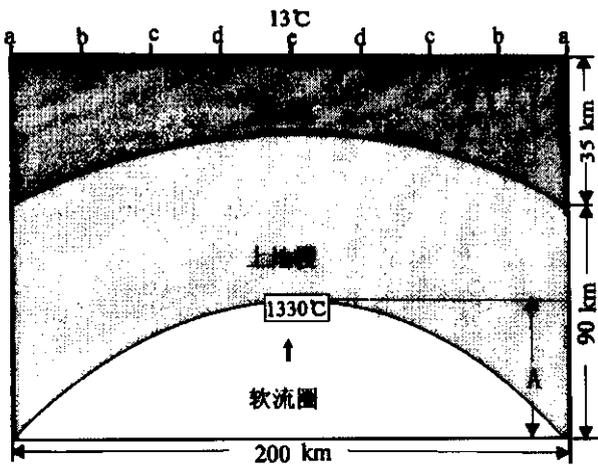


图2 伸展盆地岩石圈尺度上的二维非稳态传热模型示意图

Fig.2 Sketch map of 2-D thermal conducting model of sedimentary basin in the scale of lithosphere

给定软流圈不同的上涌幅度 A ,则岩石圈和地壳厚度受伸展因子的大小而发生变化,从而可以根据非稳态热传导方程计算出在不同伸展因子条件下,软流圈上涌后不同的时间间隔内岩石圈温度场的变化情况。图2中 a、b、c、d、e 代表了盆地内不同的构造位置, a 点为盆地边缘, e 点为盆地中心。

2.2 模型的计算方法

由于盆地古地温属于非稳态温度场,因此涉及到非稳态温度场的热传导和热对流方程(邓林等,1998):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C_w \rho_w \left[\frac{\partial}{\partial x} (v_x T) + \frac{\partial}{\partial y} (v_y T) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z T) \right] + Q = C_\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中 $x、y、z$ 为空间坐标,单位为 m ; $T = T(x, y, z)$ 为古地温场,单位为 $^\circ\text{C}$; t 为时间变量,单位为 Ma ; k 为地层热导率,单位为 $\text{cal}/\text{m} \cdot \text{Ma} \cdot ^\circ\text{C}$; ρ_w 为流体密度,单位为 kg/m^3 ; ρ 为地层介质密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^3$; C_w 为流体比热,单位为 $\text{cal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$; C 为地层比热,单位为 $\text{cal}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$; Q 为质点生成热量,单位为 $\text{cal}/\text{m}^3 \cdot \text{Ma}$; v 为流体流速,单位为 m/Ma 。

由于此次研究进行的是岩石圈尺度上的二维古地温场模拟,因此可以忽略盆地内流体的热对流效应以及沉积地层的生热效应,式(1)可变为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = C_\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

设盆地宽度为 200 km ,岩石圈厚 125 km ,地壳厚 35 km (图2),上地幔比热 $C_{um} = 1.256$,地壳比热 $C_c = 1.1473$ 。在二维空间内将盆地之下的岩石圈用 25 km 尺度进行网格化,利用全隐式差分法和超松弛迭代法求解,计算程序用 FORTRAN77 语言编写。

2.3 计算结果

图3为在非稳态传热和不同伸展因子条件下软流圈上涌 10 Ma 之后的温度场分布,表明盆地中心热流值大大高于盆地边缘,同时岩石圈的地温场明显受伸展因子大小的控制,盆地中心和边缘处不同深度的温度因伸展因子大小的差异而不同(图4),均体现出伸展盆地的典型地温场分布特征。

图5和图6表明,在不同伸展因子条件下,软流圈上涌之后的 10 Ma 范围内各个位置的温度基本上呈指数增加,而在 10 Ma 之后趋于稳定, 20 Ma 、 50 Ma 甚至 100 Ma 之后的岩石圈温度场与 10 Ma 时的差别基本不大。说明软流圈热异常大约需要

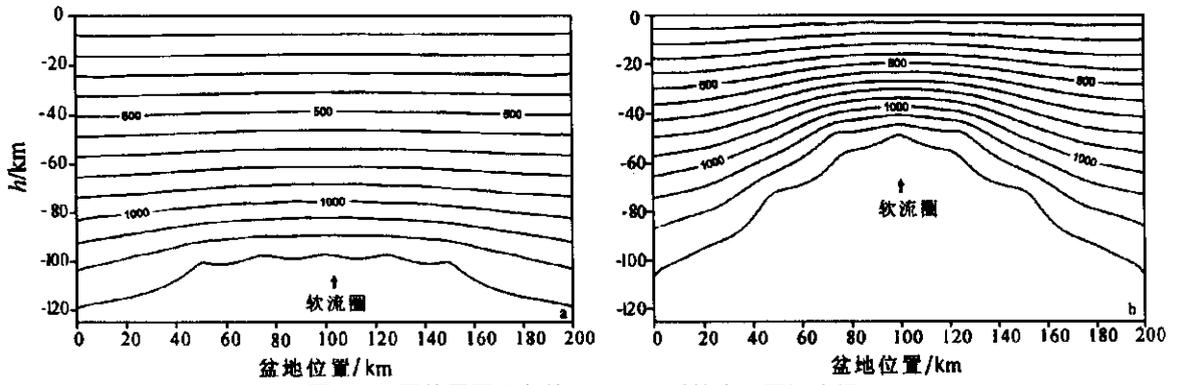


图3 不同伸展因子条件下 10 Ma 后的岩石圈温度场

Fig.3 Temperature field of lithosphere by different stretching factors after 10 Ma of asthenosphere upwelling

a-伸展因子 $\beta=1.25$ b-伸展因子 $\beta=2$

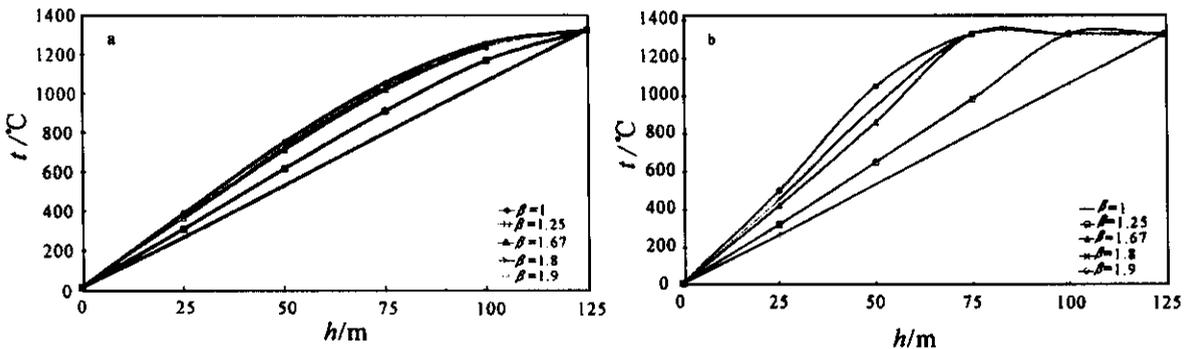


图4 盆地不同构造位置的温度场与伸展因子的变化关系

Fig.4 Temperature field distribution in the edge and center of basin by different stretching factors after 10 Ma of asthenosphere upwelling

a-盆地边缘 b-盆地中心 a点和e点位置见图2

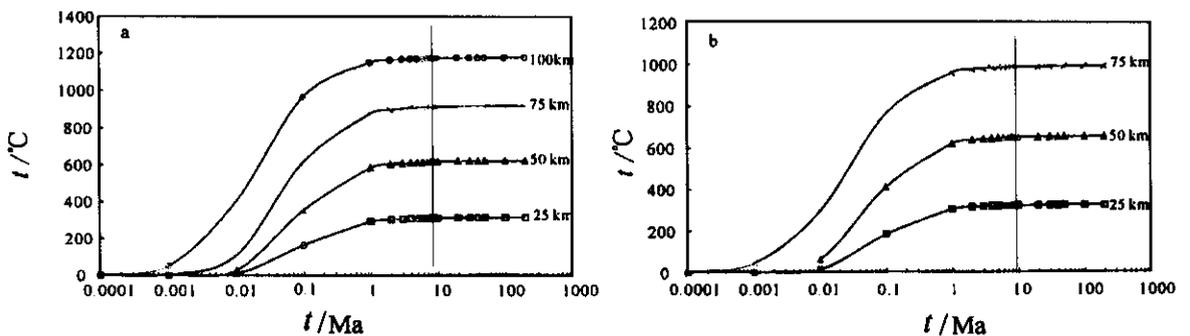


图5 伸展因子为 1.25 时盆地不同构造位置温度随时间的变化曲线

Fig.5 Temperature field variation along geological time in the edge and center of basin by the stretching factor as 1.25

a-盆地边缘 b-盆地中心

10 Ma 左右的地质时间就可以基本形成稳定的温度场,即在 10 Ma 之后的岩石圈地温场就已经基本达到温定,属于稳态的温度场。通过变化不同的模拟参数也可以获得近似的结果,这意味着 10 Ma 对于伸展盆地而言可能是一个重要的地质周期,应包含着深刻的动力学涵义。

3 讨论

以上模拟结果表明,软流圈热异常在上涌之后经过 10 Ma 的非稳态热传导作用后使岩石圈温度场基本达到稳定,由于软流圈上涌是热异常物质以及由其引发的岩石圈减薄、火山作用以及沉积盆地

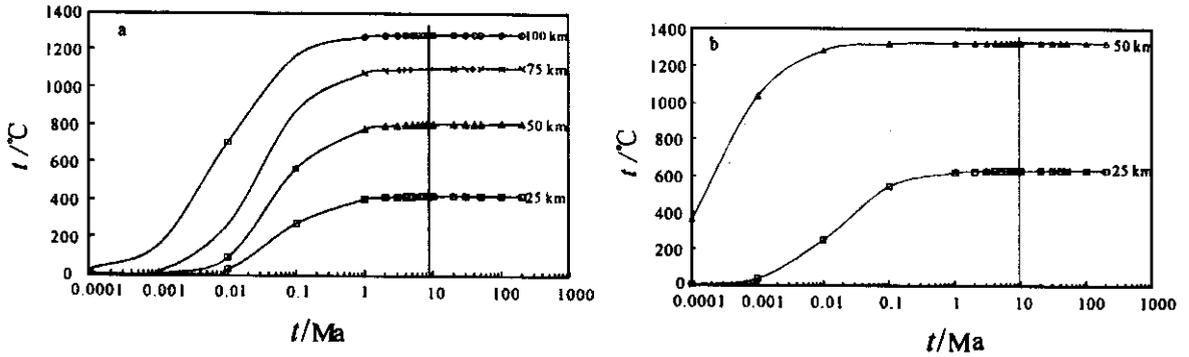


图 6 伸展因子为 2 时盆地不同构造位置温度随时间的变化曲线

Fig. 6 Temperature field variation along geological time in the edge and center of basin by the stretching factor as 2
a-盆地边缘 b-盆地中心

的形成和沉降等都是一个动态的相对平衡过程,因此这种温度场的稳定状态很难持久。此时软流圈热异常顶部已经达到最高,其动能也降至最小。根据地壳均衡原理要么地壳发生加厚作用,要么盆地整体抬升,从而造成了盆地广泛的剥蚀作用,如渤海湾盆地的晚第三纪的东营运动(史卜庆等,1999)。如果软流圈的内能也随之降低,则势必造成软流圈的热回沉,从而为盆地热沉降奠定基础。基本上所有的大陆裂谷盆地在最后一个伸展幕之后都经历了大规模的热沉降过程,而且热沉降的时限和幅度甚至与伸展裂陷阶段相当。如果软流圈内能继续升高,则会引起软流圈的进一步上涌,造成新一轮的裂陷旋回,这也是多幕式伸展裂陷旋回发生的深部动力学背景。

尽管陆相伸展盆地的沉积层序受构造、古气候、物源供应和湖平面变化等多种因素的控制,但最终只受构造和气候的控制。因此可以认为,软流圈活动制约了伸展盆地的沉降、沉积和剥蚀过程,而盆地充填状况也反映了软流圈活动的规律,二者之间存在一定的定量关系。Cox(1993)认为,软流圈上涌引起了地壳隆升、拉伸和滑脱,并存在明显的时限,即 $1 \sim 10 \text{ Ma}$,郑荣才等(2001)在陆相沉积盆地层序地层学研究中提出,超长期旋回以盆地区域性不整合面为界面,相当于 Vail 的三级层序组,时限为 $10 \sim 50 \text{ Ma}$ 。这些认识都不同程度地支持了本文的观点。

因此 10 Ma 代表了软流圈上涌以及由其引发的各种地质事件的一个旋回周期,解习农(1998)称

之为软流圈隆升幕。由于板块位置和物理性质、区域应力、软流圈热状态和古环境等因素的差异,这种周期在不同构造和古气候条件下会有所变化,因此描述为 $10 \pm \text{Ma}$,事实也表明不同盆地的伸展裂陷的旋回周期确有差异(表 1)。但无论是否存在这种差异,盆地幕式伸展沉降的特点和深部的控制因素应是普遍存在的。

4 结论

(1) 伸展盆地的幕式沉降或波动性特征普遍存在, $10 \pm \text{Ma}$ 是一个明显的演化周期。

(2) 伸展盆地岩石圈尺度的二维非温态古地温场正演模拟结果表明,岩石圈地温场明显受伸展因子大小的控制,盆地中心和边缘处不同深度的温度因伸展因子大小的差异而不同。更为重要的是,在不同伸展因子条件下,软流圈上涌 10 Ma 之后温度场趋于基本稳定。

(3) $10 \pm \text{Ma}$ 代表了伸展盆地内软流圈上涌以及由其引发的各种地质事件的一个旋回周期,由于具体地质条件存在差异,这种周期也相应会有所变化。

参考文献

- 邓林,王英民. 1998. 盆地古地温场演化动态数值模拟方法及其应用. 成都理工学院学报, 25(增刊): 38~47.
- 胡圣标,汪集. 1995. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展. 地学前缘, 2(3~4): 171~180.
- 焦养泉,周海民,刘少峰等. 1996. 断陷盆地多层次幕式裂陷作用与

- 沉积充填响应——以南堡老第三纪断陷盆地为例. 地球科学——中国地质大学学报, 21(6):633~636.
- 解习农. 1998. 中国东部中生代盆地形成演化与深部过程的耦合关系. 地学前缘, (增刊):162~165.
- 李京昌, 金之钧, 刘国臣. 1997. 对地壳波状运动时空关系的探讨——以柴达木盆地为例. 地学前缘, (3):146.
- 李思田, 林畅松, 张启明等. 1998. 南海北部大陆边缘盆地幕式裂陷的动力过程及 10 Ma 以来的构造事件. 科学通报, 43(8):797~802.
- 陆现彩, 胡文宣, 顾连兴. 1998. 地幔对流及其对地壳表层拉张盆地的影响. 地学前缘, (增刊):184~190.
- 任建业, 刘文龙, 林畅松等. 1996. 中国大陆东部晚中生代裂陷作用的表现形式及其幕式扩展. 现代地质, 10(4):526~531.
- 史卜庆, 吴智平, 王纪祥等. 1999. 渤海湾盆地东营运动的特征及成因分析. 石油实验地质, 21(3):196~200.
- 王鸿祯. 1997. 地球的节律与大陆动力学的思考. 地学前缘, (3):1~12.
- 张一伟, 李京昌, 金之钧等. 1997. 中国含油气盆地波状运动特征研究. 地学前缘, (4):306~310.
- 郑荣才, 彭军, 吴朝容. 2001. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义. 沉积学报, 19(2):249~254.
- 周瑶琪, 吴智平, 章大港等. 1997. 对地质节律与地球动力系统的思考. 地学前缘, (3):85~94.
- Cox K G. 1993. Continental magmatic underplating. Phil Trans R Soc Lond, A342:155~166.
- Mark R, Michael A. 1988. Tectonic-stratigraphic development of the Neogene Gulf of Suez rift basin. AAPG Bulletin, 72(8):1021.
- Mcclay K, Dooley T, Terguson A et al. 2000. Tectonic evolution of the Sanga Sanga block, Mahakam delta, Kalimantan, Indonesia. AAPG Bulletin, 84(6):765~786.
- Mckenzie D P. 1978. Some remarks on the development of sedimentary basins. Earth Planet. Sci. Lett., 40:25~30.
- Mohriak W U, Mello M R, Kerner G D et al. 1989. Structural and stratigraphic evolution of the Campos basin, offshore Brazil. In: Tankowd A J and Balkwill H R ed. Extensional tectonic and stratigraphy of the North Atlantic Margins. AAPG Memoir 46, 577~586.
- Sempere T, Butler R F, Richards D R et al. 1997. Stratigraphy and chronology of Upper Cretaceous-lower Paleogene strata in Bolivia and Northwest Argentina. Geological Society of America Bulletin, 109(6):709~727.